



**Hugo Manuel Fernandes Rações**

Licenciado em Ciências de Engenharia Física

## **Simulação térmica de dois criorrefrigeradores redundantes**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Física**

Orientador: Grégoire Bonfait,  
Prof. Associado com Agregação,  
Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Diogo Lopes,  
Engenheiro Técnico,  
Air Liquide

Júri

Presidente: Doutor Yuri Fonseca da Silva Nunes  
Arguentes: Engenheiro Moritz Branco  
Vogais: Doutor Grégoire Bonfait



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2015**



## **Simulação térmica de dois criorrefrigeradores redundantes**

Copyright © Hugo Manuel Fernandes Rações, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Este documento foi gerado utilizando o processador (pdf)  $\text{\LaTeX}$ , com base no template “unlthesis” [1] desenvolvido no Dep. Informática da FCT-NOVA [2]. [1] <https://github.com/joaomlorenco/unlthesis> [2] <http://www.di.fct.unl.pt>



*Aos meus pais*



## AGRADECIMENTOS

Quero aproveitar esta página para agradecer a todos os que me apoiaram e estiveram ao meu lado ao longo destes anos académicos.

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador, Prof<sup>o</sup> Grégoire Bonfait, por toda disponibilidade, apoio e constante aprendizagem ao longo deste projeto.

Quero agradecer também ao Diogo Lopes, pela ajuda fundamental na compreensão de muitas situações desta dissertação.

De seguida, quero agradecer aos meus colegas e amigos de laboratório, Jorge, Gonçalo e Patrícia, pela ajuda na resolução de problemas relacionados com este trabalho, pelo apoio, paciência e pela boa disposição, que ajudou sempre nas horas mais difíceis.

Não posso esquecer de agradecer ao David e ao João, por toda a ajuda na aprendizagem e no esclarecimento de dúvidas sobre o Java<sup>TM</sup>, sem eles acredito que não seria possível ter criado um programa tão completo como o nosso.

Quero deixar também um muito obrigado a todos os meus amigos, quer no ensino obrigatório, quer na licenciatura, quer no mestrado, foi com o vosso apoio e amizade que muitas lutas foram vencidas.

Por último, e sem menosprezar os anteriores, quero fazer o agradecimento mais importante: à minha família. Por todo o apoio demonstrando ao longo de todos os anos. Quero agradecer em especial à minha namorada pelo apoio e paciência nos momentos mais complicados, à minha avó pelo grande contributo que teve na minha educação e aos meus pais e irmão, pelo apoio e amor incondicional, pelos esforços realizados para que eu tivesse esta oportunidade e por serem quem são.

Um muito obrigado a todos!





## RESUMO

---

A exploração do universo tem sido um dos maiores objetivos da humanidade, entre eles a possibilidade de existir e conhecer outros mundos.

Para que essa exploração se realize, existem sensores, que necessitam de temperaturas criogénicas para funcionarem, permitindo assim a observação espacial. Esse arrefecimento pode ser feito por um sistema apenas com um criorrefrigerador acoplado ao sensor, mas se houver uma avaria no criorrefrigerador, que provoque a sua paragem, a missão falha.

Para evitar a falha da missão, devido à paragem do criorrefrigerador, pode-se utilizar um sistema redundante de dois criorrefrigeradores. Este sistema tem a desvantagem de ter grandes perdas térmicas, o que diminui a potência frigorífica disponível.

Para otimizar esta solução, pode-se introduzir interruptores térmicos, diminuindo assim as perdas térmicas. No entanto, as limitações térmicas destes interruptores nos estados “ligado” ou “desligado” devem ser tomadas em consideração para avaliar o desempenho térmico e mecânico do sistema.

Nesta tese, um modelo térmico de diferentes sistemas de arrefecimento de sensores foi estabelecido. Foi escrito um programa na linguagem de programação Java<sup>TM</sup> para facilitar a comparação do desempenho térmico destas diferentes soluções. Permite, em particular, obter as dimensões de interruptor de tipo “interruptores térmicos de gás de troca”, que permite um ganho importante da potência elétrica consumida pelo criorrefrigeradores redundantes.

**Palavras-chave:** Criogenia, Potência frigorífica, Redundância, Interruptor térmico, *Redundant Cryocoolers Simulations*

---



## ABSTRACT

---

The exploration of the universe has been one of the major objectives of mankind, the possibility to exist or meet other worlds.

To perform this exploration there are sensors, that must work at cryogenics temperatures, to allow space observation. This cooling may be done using a system with one cryocooler coupled to a sensor, but if there is a malfunction in the cryocooler, causing his stop, the missions fails. To avoid the failure of the mission, due to the stop of the cryocooler, it can be use a redundant system with two cryocoolers. This system has the disadvantage of having large heat losses, which influences the cooling power available.

To optimize this solution, heatswitches can be used, reducing the heat losses. However, the thermal limitations of these switches in the states "on" or "off" should be taken into consideration to evaluate the thermal and mechanical performance of the system.

In this thesis, a thermal model of different sensors cooling systems was established. It was created a program in Java<sup>TM</sup> programming language to facilitate the comparison between the thermal performance of these different solutions. It specifically allows to obtain the dimensions of the gas-gap heatswitch which allows a significant gain in electric power consumed by redundant cryocoolers.

**Keywords:** Cryogenics, Cooling power, Redundancy, Heat switch, Redundant Cryocoolers Simulations

---



# ÍNDICE

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Redundância de sistemas criogénicos</b>	<b>3</b>
2.1 Sistema criogénicos . . . . .	3
2.2 Criorrefrigeradores . . . . .	7
<b>3 Interruptores térmicos</b>	<b>11</b>
3.1 Interruptor térmico a gás de troca . . . . .	11
3.2 Transferência de calor . . . . .	12
3.2.1 Condução térmica em sólidos . . . . .	13
3.2.2 Condução térmica em gases . . . . .	13
<b>4 Análise térmica de sistemas criogénicos redundantes</b>	<b>17</b>
4.1 Sistema simples . . . . .	17
4.2 Sistema de dois criorrefrigeradores redundantes sem interruptores térmicos . . . . .	19
4.3 Sistema de dois criorrefrigeradores redundantes com interruptores térmicos . . . . .	20
4.3.1 Caso geral . . . . .	20
4.3.2 Caso com interruptores térmicos de gás de troca . . . . .	21
<b>5 Implementação em Java<sup>TM</sup></b>	<b>29</b>
5.1 História do Java <sup>TM</sup> . . . . .	29
5.2 Redundant Cryocoolers Simulations . . . . .	29
5.2.1 Interface gráfica do utilizador . . . . .	30
5.3 Obtenção da temperatura do criorrefrigerador desligado . . . . .	37
5.4 Verificação do programa . . . . .	38
5.4.1 Verificação de $\Delta T$ no interruptor térmico . . . . .	39
5.4.2 Verificação da potência dos criorrefrigeradores . . . . .	40
5.4.3 Conservação de energia do sistema . . . . .	42

<b>6 Resultados e discussão</b>	<b>43</b>
6.1 Sistema simples e sistemas redundantes com e sem interruptores térmicos	43
<b>7 Conclusões</b>	<b>51</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>53</b>
<b>A Apêndice</b>	<b>55</b>
A.1 Tabelas de condutividades térmicas dos gases . . . . .	55
A.2 Pseudo-Código . . . . .	57

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Criorrefrigerador térmicamente acoplado a um sensor. . . . .	3
2.2	Sistema de dois criorrefrigeradores redundantes. . . . .	4
2.3	Razões e respectivas percentagens de fontes de perdas térmicas, adaptado de [2].	5
2.4	Sistema redundante com interruptores térmicos. . . . .	5
2.5	Efeito da redundância na fiabilidade de um sistema de arrefecimento, adaptado de [1] . . . . .	6
2.6	Esquema de principio de funcionamento de criorrefrigerador Joule-Thomson, adaptado de [8]. . . . .	8
2.7	Esquema de um criorrefrigerador do tipo Stirling, adaptado de [10]. . . . .	9
2.8	Esquema do criorrefrigerador do tipo Pulse-Tube, adaptado de [12]. . . . .	9
3.1	Esquema de um interruptor térmico a gás de troca com carvão activado[14].	12
3.2	Regimes da condução térmica em gases: viscoso e molecular, adaptado de [16].	14
4.1	Esquema de um criorrefrigerador térmicamente acoplados a um sensor. . . .	17
4.2	Ligação de cobre [19]. . . . .	18
4.3	Esquema de Sistema de dois criorrefrigeradores redundantes sem interruptores térmicos. . . . .	19
4.4	Esquema de um sistema de dois criorrefrigeradores redundantes com interruptores térmicos. . . . .	21
4.5	Sistema de dois criorrefrigeradores redundantes com interruptores térmicos com bomba criogénica acoplada a cada criorrefrigerador. . . . .	22
4.6	Vista frontal do interruptor térmico, adaptado de [16]. . . . .	23
4.7	Vista superior do interruptor térmico, adaptado de [16]. . . . .	23
4.8	Condutividade térmica do Hidrogénio, Hélio, Azoto e Neón a uma pressão de 1 bar e respetivos <i>fits</i> de grau 2 utilizados no programa do Java <sup>TM</sup> . . . . .	25
4.9	Esquemático do criorrefrigerador parado acoplado ao interruptor térmico desligado. . . . .	26
5.1	Janela inicial do programa RCS. . . . .	30
5.2	Separador relativo a equação de potência elétrica na opção <i>condutância fixa</i> . .	31
5.3	Potência elétrica em função da temperatura a potências frigoríficas compreendidas entre 0.5 e 3.5 W. . . . .	31

5.4	Separador relativo à terceira configuração na opção <i>condutância fixa</i> . . . . .	32
5.5	Separador relativo a equação de potência elétrica na opção <i>condutância variável</i> . . . . .	33
5.6	Separador relativo à terceira configuração na opção <i>condutância variável</i> . . . . .	33
5.7	Esquema de um sistema de dois criorefrigeradores redudantes com interruptores térmicos, com as temperaturas das extremidades do interruptor evidenciadas. . . . .	34
5.8	Secção relativa aos tubos dos criorefrigeradores na terceira configuração na opção <i>condutância variável</i> . . . . .	34
5.9	Secção relativa aos interruptores térmicos na terceira configuração na opção <i>condutância variável</i> . . . . .	35
5.10	Gráfico da potência elétrica em função da potência do sensor de todas as configurações. . . . .	35
5.11	Gráfico da potência elétrica em função da temperatura do criorefrigerador ligado de todas as configurações. . . . .	36
5.12	Separador relativo à tabelas da configuração da figura 5.6. . . . .	36
5.13	Secção do separador ilustrado na figura 5.12. . . . .	38
5.14	Dimensões e parâmetros dos componentes do sistema redundante com interruptores. . . . .	38
6.1	Parâmetros e dimensões do sistema simples e do sistema redundante sem interruptor e do sistema redundante com interruptor. Interruptores com invólucro de diâmetro 24.8 mm e comprimento de 54 mm e temperatura do sensor igual a 50 K. . . . .	44
6.2	Potência elétrica em função da potência do sensor para todos os sistemas com os parâmetros da figura 6.1. . . . .	44
6.3	Temperatura dedo frio do criorefrigerador ligado em função da potência do sensor para todos os sistemas com os parâmetros da figura 6.1. . . . .	45
6.4	Potência elétrica em função da potência do sensor para todos os sistemas com os parâmetros da figura 6.1 a uma temperatura de 60 K. . . . .	46
6.5	Parâmetros e dimensões do sistema simples e do sistema redundante sem interruptor e do sistema redundante com interruptor. Interruptores com invólucro de diâmetro 20 mm e comprimento de 300 mm e temperatura do sensor igual a 50 K. . . . .	47
6.6	Potência elétrica em função da potência do sensor para todos os sistemas com os parâmetros da figura 6.5. . . . .	47
6.7	Condutâncias dos componentes das diferentes configurações. Condutância do estado ligado (JON) = 1 W/m. Condutância do estado desligado (JOFF) = 0.003 W/m. . . . .	48
6.8	Potência elétrica em função da potência do sensor para todos os sistemas com os parâmetros da figura 6.7. . . . .	49



6.9	Condutâncias dos componentes das diferentes configurações. Condutância do estado ligado (JON) = 1 W/m. Condutância do estado desligado (JOFF) = 0.0005 W/m. . . . .	49
6.10	Potência elétrica em função da potência do sensor para todos os sistemas com os parâmetros da figura 6.9. . . . .	50
A.1	Diagrama de blocos relativo à classe "CuRRR100". . . . .	57
A.2	UML relativo à classe "CuRRR100". . . . .	57
A.3	Diagrama de blocos relativo à classe "condutância". . . . .	58
A.4	UML relativo à classe "condutância". . . . .	58
A.5	UML relativo à classe "controle". . . . .	58
A.6	Diagrama de blocos relativo à classe "controle". . . . .	59



## LISTA DE TABELAS

2.1	Probabilidade de falha nos interruptores térmicos de gás de troca e de dilatação, respetivamente, adaptado de [1] . . . . .	6
2.2	Probabilidade de falha dos três sistemas em estudo, adaptado de [1]. . . . .	7
2.3	Probabilidade de falha em diferentes tipos de criorefrigeradores, adaptado de [1]. . . . .	10
5.1	Coeficiente utilizados na equação da potência elétrica. . . . .	31
5.2	Valores de potências e temperaturas do sistema a partir dos parâmetros da figura 5.14 obtidos pelo RCS para a configuração simples. . . . .	37
5.3	Valores de potências e temperaturas do sistema a partir dos parâmetros da figura 5.14 obtidos pelo RCS para a configuração redundante sem interruptores térmicos. . . . .	37
5.4	Valores de potências e temperaturas do sistema a partir dos parâmetros da figura 5.14 obtidos pelo RCS para a configuração redundante com interruptores térmicos. . . . .	37
5.5	Secção transversal e razão $\frac{S}{L}$ dos diferentes componentes do sistema. . . . .	38
5.6	Valores para comparação entre $\Delta$ teórico e $\Delta$ obtido do interruptor no modo ligado. . . . .	39
5.7	Valores para comparação entre $\Delta$ teórico e $\Delta$ obtido do interruptor no modo desligado. . . . .	40
5.8	Valores de potências obtidos e teóricos e erro relativo associado correspondente à equação 5.3. . . . .	41
5.9	Valores de potências obtidos e teóricos e erro relativo associado correspondente à equação 5.4. . . . .	41
5.10	Valores de potências obtidos e teóricos e erro relativo associado correspondente à equação 5.5. . . . .	41
5.11	Subtração da potências com valor da potência teórica retirado da tabela 5.8. . . . .	42
5.12	Subtração da potências com valor da potência teórica retirado da tabela 5.9. . . . .	42
A.1	Erros relativos e condutividades térmicas do Hidrogénio. . . . .	55
A.2	Erros relativos e condutividades térmicas do Hélio. . . . .	55
A.3	Erros relativos e condutividades térmicas do Azoto. . . . .	56
A.4	Erros relativos e condutividades térmicas do Néon. . . . .	56



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\dot{Q}$  - Calor transferido por unidade de tempo.

$\lambda$  - Livre percurso médio.

$\delta$  - Distância entre as extremidades.

$\sigma$  - Secção eficaz de colisão.

$\gamma$  - Razão entre a capacidade calorífica a pressão e volume constantes.

$\alpha$  - Coeficiente de acomodação.

$\eta(T)$  - Viscosidade.

$C$  - Capacidade térmica volúmica.

$C_{mol}$  - Capacidade térmica molar.

$K$  - Condutância térmica.

$L$  - Comprimento.

$M$  - Massa molar.

$N_A$  - Número de *Avogadro*.

$P$  - Pressão.

$R$  - Resistência térmica.

$R_g$  - Constante dos gases ideais.

$S$  - Secção transversal ao fluxo de calor.

$T$  - Temperatura.

$c_p$  - Capacidade calorífica a pressão constante.

$c_v$  - Capacidade calorífica a volume constante.

$k$  - Condutividade térmica.

## LISTA DE SÍMBOLOS

---

$n$  - Número de moléculas por unidade de volume.

$q''$  - Fluxo transportado a uma dimensão.

## INTRODUÇÃO

A criogenia é uma ferramenta no ramo da engenharia que é cada vez mais utilizada na instrumentação espacial para melhorar a observação da terra ou do universo.

A observação espacial é possível através de sensores que utilizam a detecção de infravermelhos e que necessitam de estar a temperaturas criogénicas para funcionarem. Para isso são usadas diferentes técnicas de arrefecimento, tais como: os fluídos criogénicos ou os criorrefrigeradores.

Os criorrefrigeradores têm a vantagem de ter um menor volume e funcionarem durante anos, mas a sua maior desvantagem em relação aos líquidos é a sua mecânica, que não tem possibilidade de reparação, levando, em caso de avaria, à falha da missão.

Actualmente, há dois tipos de sistemas que vêm sendo utilizados para alcançar as temperaturas criogénicas que são necessárias para os sensores funcionarem, são eles: o sistema com um criorrefrigerador acoplado a um sensor, por uma ligação térmica, e o sistema com dois criorefrigeradores redundantes acoplados a um sensor.

Este problema vem sendo estudado cada vez mais, de modo a que seja solucionado. A Agência Espacial Europeia (ESA) lançou recentemente um projecto que visa diminuir o efeito negativo da redundância na performance do sistema, através de um estudo e caracterização dos sistemas.

Uma solução para aumentar a eficiência do sistema, passa por dotar cada criorrefrigerador de um interruptor térmico entre ele e o sensor. Apesar da inclusão destes interruptores térmicos a ativação e desativação do interruptor necessita de uma acção externa, o que pode ser conseguido com um tipo específico de interruptor, o interruptor térmico de gás de troca.

Neste trabalho será desenvolvido um programa que permite um estudo de cada um dos sistemas e a comparação entre sistemas, de forma a saber qual o possível ganho de eficiência em função das características do interruptor.

Nesta dissertação a redundância de sistemas criogénicos é apresentada no capítulo 2, os interruptores térmicos são apresentados no capítulo 3, a análise térmica de sistemas criogénicos redundantes é apresentada no capítulo 4, a implementação em Java<sup>TM</sup> é apresentada no capítulo 5 e os resultados e sua respectiva análise são apresentados no capítulo 6.



## REDUNDÂNCIA DE SISTEMAS CRIOGÊNICOS

### 2.1 Sistema criogénicos

Na gama dos 40 K - 150 K os sensores para observação espacial são geralmente arrefecidos por um criorefrigerador. Uma configuração simples encontra-se esquematizada na 2.1. Neste caso a missão falhará assim que o criorefrigerador deixar de funcionar.

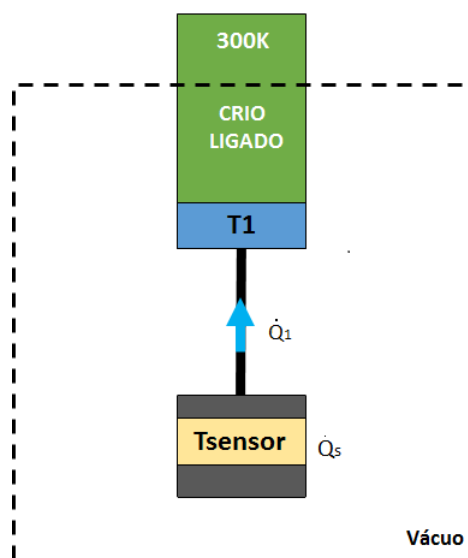


Figura 2.1: Criorefrigerador termicamente acoplado a um sensor.

Para evitar que a missão seja comprometida, pode-se utilizar um sistema de dois criorefrigeradores redundantes (figura 2.2). A redundância permite que quando um criorefrigerador ligado deixe de estar operacional, outro criorefrigerador, que estará até aquele momento parado, entre em funcionamento prosseguindo assim o arrefecimento do sensor, alargando o tempo de vida da missão.

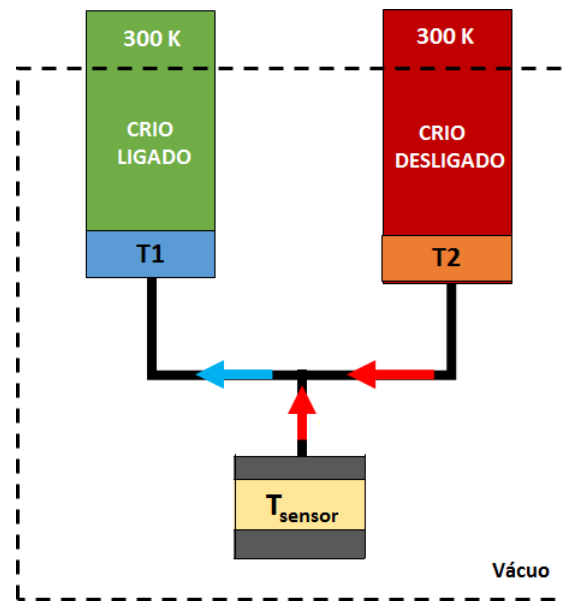


Figura 2.2: Sistema de dois criorefrigeradores redundantes.

Este caso *standard* consegue precaver uma eventual falha da missão devido à avaria do criorefrigerador. O criorefrigerador parado, apesar de não estar a funcionar, deixa passar potência, designada por perdas térmicas. Esta potência influencia negativamente o criorefrigerador ligado, diminuindo assim a potência frigorífica disponível para o arrefecimento do sensor.

Não há muitas informações sobre este tipo de sistema, excepto um artigo de Ross publicado em 2000 [1], que dá ênfase a este tema. A falta ou pouca informação deve-se à confidencialidade que existe sobre a redundância de sistemas. O gráfico da figura 2.3 foi concebido pela ESA [2] e mostra todas as fontes de perdas térmicas neste tipo de sistemas, sendo o calor parasita proveniente do criorefrigerador parado a fonte com maior percentagem, seguida pela radiação de superfícies mais quentes.

Há outros tipos de perdas térmicas como mostra o gráfico da figura 2.3, mas neste estudo apenas será considerado o calor parasita proveniente do criorefrigerador parado.

Com o aumento do calor parasita, a potência frigorífica disponível para arrefecer o sensor será menor, levando a uma diminuição da eficiência do sistema, e consequentemente a obrigará ao aumento da potência do criorefrigerador o que implica um aumento da potência elétrica do sistema.

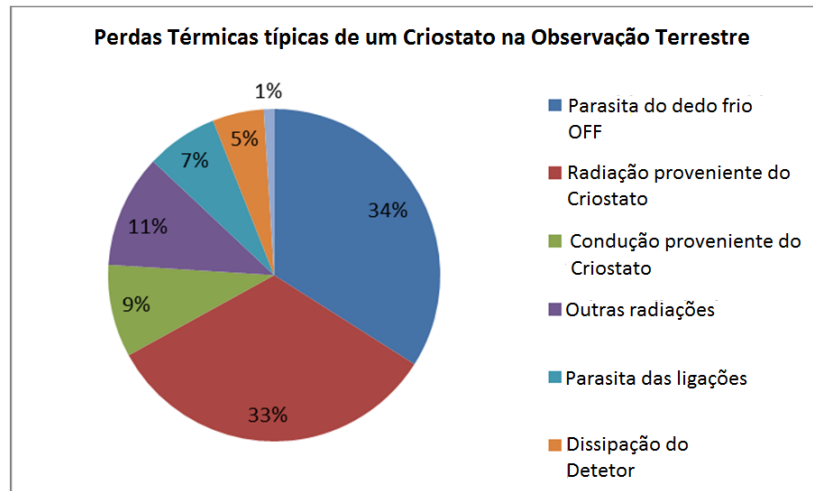


Figura 2.3: Razões e respectivas percentagens de fontes de perdas térmicas, adaptado de [2].

De modo a remediar os inconvenientes deste sistema é necessário diminuir esse calor e para isso são introduzidos dois interruptores térmicos [3][4] (figura 2.4), cada um destes acoplados térmicamente a cada criorefrigerador.

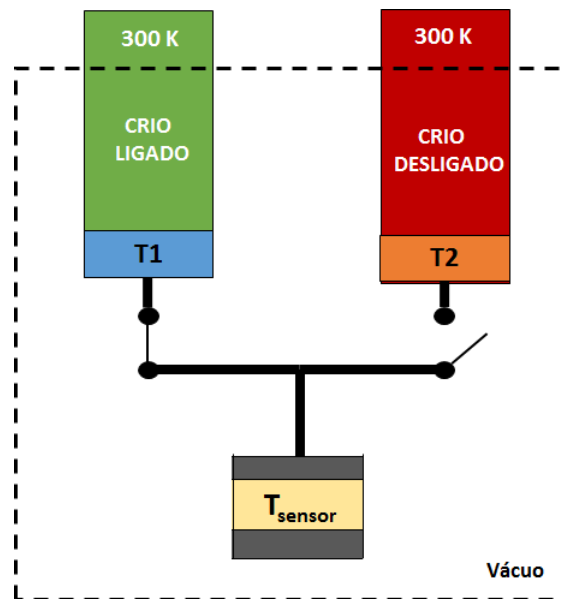


Figura 2.4: Sistema redundante com interruptores térmicos.

Esta solução reduz a potência parasita proveniente do criorefrigerador parado, no entanto, carece de um sistema de atuação passivo, i.e, a redundância não consegue ser automática sendo necessário um uma atuação externa para alternar o estado dos criorefrigeradores. Para que a redundância seja passiva, uma solução possível, é a utilização de interruptores térmicos de gás de troca actuada por uma bomba criogénica [5].

Apesar desta inclusão solucionar os maiores problemas, não se pode deixar de referir que os interruptores térmicos são um instrumento mecânico, havendo a possibilidade de existirem avarias. As suas características térmicas podem limitar o desempenho global do sistema.

Pela tabela 2.1, pode-se estimar a probabilidade do interruptor térmico de gás de troca e o de dilatação ( *CTE driven heatswitch* [1]) de falharem. Analisando a tabela 2.1, constata-se que a probabilidade de falha do interruptor de dilatação é um pouco menor que a do interruptor de gás de troca, isto porque a presença de gás no interruptor aumenta o valor de probabilidade de falha.

Tabela 2.1: Probabilidade de falha nos interruptores térmicos de gás de troca e de dilatação, respetivamente, adaptado de [1]

Mecanismos de falha	Interruptor a gás de troca com adsorção	Interruptor baseado em CTE
<b>Falha do interruptor no lançamento</b>		
Diminuição crítica do <i>gap</i> devido a distorção do sistema	0.5	0.5
Fugas desenvolvidas pelo sistema de actuação do gás	0.1	
<b>Falha do interruptor na passagem de modo OFF para ON</b>		
Diminuição crítica de <i>gap</i> devido a deformação	3	3
Falha do sistema devido a libertação de gás	5	
Acoplamento de superfícies do interruptor CTE		4
<b>Falha do interruptor na passagem de modo ON para OFF</b>		
Falha do sistema devido a introdução de gás	1	
Falta de gás devido a fuga de longo termo	2	
<b>Total probabilidade de falha do sistema do interruptor (%)</b>	<b>11.6</b>	<b>7.5</b>

Ross [1] tentou quantificar os problemas e as vantagens da redundância, mostrando e comparando as probabilidades de falha de sistemas redundantes com e sem interruptores, (tabela 2.2), bem como a fiabilidade dos sistemas. O gráfico da figura 2.5, relaciona a fiabilidade do criorefrigerador e do interruptor térmico e a fiabilidade de todo o sistema, ilustrando qual deles o mais fiável.

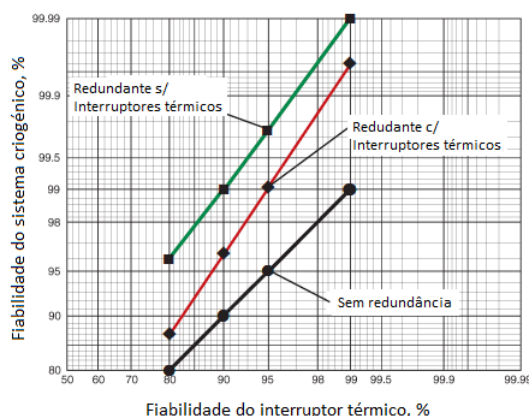


Figura 2.5: Efeito da redundância na fiabilidade de um sistema de arrefecimento, adaptado de [1]

Comparando a fiabilidade dos sistemas da figura anterior conclui-se que o sistema redundante sem interruptores térmicos é o mais fiável. Embora seja o mais fiável, não deixa de ter um inconveniente: a influência do calor parasita na potência frigorífica. Pela tabela 2.2 consegue-se analisar sistema simples, que em comparação com os outros tem a maior probabilidade de falhar. Considerando este factor do sistema simples e o calor parasita do sistema sem interruptores, o melhor sistema seria o redundante com os interruptores térmicos.

Tabela 2.2: Probabilidade de falha dos três sistemas em estudo, adaptado de [1].

ITEM	2 Refrigeradores c/ 2 Elect. s/ Interruptores	2 Refrigeradores c/ 2 Elect. c/ Interruptores	1 Refrigerador c/ 1 Elect. Sem redundância
PODER FRIGORÍFICO (W)			
Poder frigorífico total (mW)	1156	752	554
Potência de compressor necessária (W)	462	300	22.2
Nível de pot. de comp. w.r.t 50W (%)	92	60	45
Pot. elétrica do ref. ( $\eta = 0.85 + 5W$ )	13.2	10.3	8.9
Potência total S/C do refrigerador (W)	59.4	40.3	31.1
MASSA DO REF. (por instrumento, kg)			
Refrigerador mecânico	8	8	4
Electrónica do refrigerador	12	12	6
Massa do sistema S/C (0.375 kg/W)	22	15	12
Massa total do sistema S/C	42	35	22
PROBABILIDADE DE FALHA SISTEMA			
Equação	$P = (P_c + P_e)^2$	$P = (P_c + P_e + P_{sw})^2$	$P = P_e + P_c$
Probabilidade de falha do ref, $P_c$ (%)	10.6	7.5	5.0
Probabilidade de falha da elec., $P_e$ (%)	10	9	8
Probabilidade de falha do inter $P_{sw}$ (%)	n/a	7.5	n/a
Probab. de falha geral do sistema (%)	4.2	5.8	13

Com a introdução dos interruptores térmicos a probabilidade dos criorefrigeradores falharem é muito menor, bem como a electrónica do sistema, mas os interruptores podem eles mesmo falhar, o que implica um aumento de falha do sistema global.

## 2.2 Criorefrigeradores

Tal como referido anteriormente, os criorefrigeradores são utilizados para arrefecer um aparelho até temperaturas da gama dos 40-100 K. Os sensores trabalham a temperaturas baixas de modo a prevenir que as suas medições sejam distorcidas pela radiação característica dos instrumentos [6]. Muitos dos instrumentos espaciais das agências espaciais necessitam de refrigeração criogénica para melhorar a gama dinâmica, estender a cobertura de comprimento de onda, ou permitir o uso de detetores avançados para observar uma grande variedade de fenómenos de nascimento estelar [7]. Há vários tipos de criorefrigeradores, mas os mais utilizados em missões espaciais são:

- Joule-Thomson
- Stirling

- Pulse Tube

É necessário entender o funcionamento dos diferentes tipos de criorefrigeradores, as suas diferenças e os seus maiores problemas.

### Criorrefrigerador Joule-Thomson

Este é um tipo de criorrefrigerador que utiliza a expansão de Joule-Thomson, permitindo o arrefecimento do gás graças à expansão irreversível (entalpia constante) através de uma restrição. A expansão é imposta pela válvula de Joule-Thomson.

O princípio de funcionamento e os componentes do criorrefrigerador Joule-Thomson estão esquematizados na figura 2.6. O compressor tem a desvantagem de ser uma fonte de possíveis problemas mecânicos, porque é habitualmente mecânico, provocando oscilações de pressão no sistema e vibrações indesejadas ao sistema.

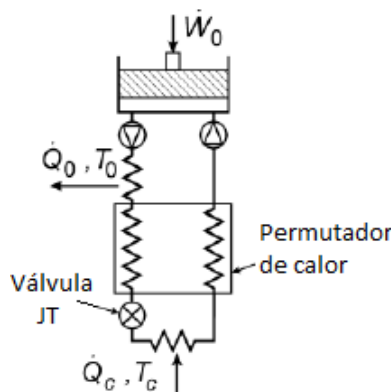


Figura 2.6: Esquema de princípio de funcionamento de criorrefrigerador Joule-Thomson, adaptado de [8].

### Criorrefrigerador do tipo Stirling

Os criorrefrigeradores do tipo Stirling são frequentes nas missões espaciais. São constituídos por dois elementos específicos [9] :

- um compressor, que funciona à temperatura ambiente. Neste elemento o pistão transmite o trabalho mecânico ao ciclo do gás e fornece uma oscilação de pressão no dedo frio.
- um *displacer*, que separa dois volumes à temperatura ambiente e fria.

Tal como nos criorrefrigeradores de Joule-Thomson, este criorrefrigerador tem na sua constituição um compressor, que é uma fonte de avarias por ser um instrumento mecânico.

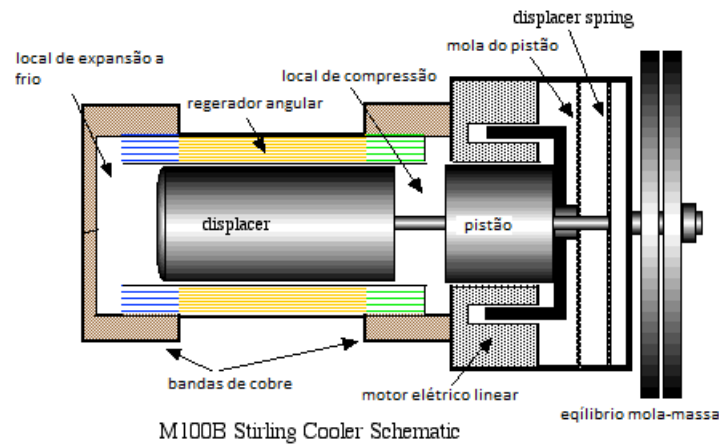


Figura 2.7: Esquema de um criorefrigerador do tipo Stirling, adaptado de [10].

### Criorefrigerador do tipo Pulse-Tube

Este tipo de criorefrigerador tem um princípio de funcionamento similar aos do tipo Stirling, mas tem a vantagem de não ter partes móveis perto da zona de baixa temperatura, o que aumenta a sua fiabilidade e reduz as vibrações exportadas na zona do sensor.

Os criorefrigeradores do tipo Stirling Pulse Tube têm dois componentes, o compressor (tal como os criorefrigeradores anteriores), onde a energia elétrica é utilizada para comprimir o gás, de maneira a obter as ondas de pressão necessária ao ciclo de arrefecimento, e o tubo ligado ao dedo frio, onde o arrefecimento acontece devido à energia proveniente do compressor [11]. Com estes dois mecanismos obtém-se um criorefrigerador de eficiência semelhante a de um Stirling, mas de alta fiabilidade e de tamanho reduzido. O esquema do criorefrigerado do tipo Pulse-Tube é descrito na figura 2.8.

A ausência de partes móveis a baixa temperatura, contrariamente ao ciclo de Stirling, torna-o mais fiável e é atualmente muito utilizado para missões espaciais na gama de 40 K-100 K.

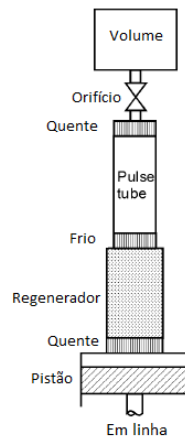


Figura 2.8: Esquema do criorefrigerador do tipo Pulse-Tube, adaptado de [12].

De modo a comparar diferentes tipos de criorefrigeradores e usando a experiência adquirida ao longo de vários anos, como descrita por Ross [1], utilizaram-se vários parâmetros, desde a probabilidade de contaminação à probabilidade de falha de motor de expansão.

Tabela 2.3: Probabilidade de falha em diferentes tipos de criorefrigeradores, adaptado de [1].

Mecanismo de falha	Pulse Tube com Compressor	Stirling + Bal. com Compressor
Contaminação interna excessiva	2	3
Vedação hermética	2	2.5
Quebra de mola de flexão do compressor	0.1	0.1
Quebra do motor de isolamento do comp.	1	1
Falha no alinhamento do pistão do comp.	0.2	0.2
Desgaste do pistão do comp	1	1
Falha no sensor de posição do pistão	1	1
Falha na estrutura de expansão	0.2	0.2
Desgaste do expansor	0	3
Quebra do motor de isolamento do exp.	0	0.5
Falha no alinhamento do exp.	0	0.2
Falha no sensor de posição do exp.	0	1
Probabilidade total de falha (%)	7.5	13.7

Como se pode verificar na tabela 2.3, os Pulse-Tube têm a menor probabilidade de falha. Apesar de terem um compressor, tal como os outros criorefrigeradores, devido a não ter partes móveis a sua fiabilidade é maior. As partes móveis dos criorefrigeradores de Joule-Thomsons e do tipo Stirling, são fontes de vibração e têm um pequeno tempo de vida [8], contribuindo assim para o crescimento de utilização do criorefrigerador do tipo Pulse-Tube em missões.

Depois de saber quais os tipos de criorefrigeradores utilizados e qual deles tem uma menor probabilidade de falhar na missão, é preciso compreender quais os interruptores térmicos mais utilizados e o seu funcionamento.



## INTERRUPTORES TÉRMICOS

Estes instrumentos permitem alternar entre dois estados térmicos, o **ligado** e o **desligado**. Quando se pretende que haja uma elevada condução térmica, o interruptor está no estado ligado. No entanto, quando se pretende uma reduzida condução, é preciso que o interruptor esteja no estado desligado.

Para diminuir o calor parasita, do criorrefrigerador parado, o interruptor encontra-se no estado desligado. Assim há uma condução térmica baixa diminuindo as perdas térmicas, aumentando assim a potência frigorífica disponível para os sensores. A condução térmica será reduzida porque este aparelho desconecta componentes quando o arrefecimento não é necessário.

Há muitos tipos de interruptores térmicos, entre os quais dois que são particularmente adequados para as aplicações espaciais na gama de temperaturas pretendida:

- Interruptor térmico a gás de troca [5]
- Interruptor térmico utilizando fenómenos de dilatação, adaptado de [13]

Para a nossa situação em específico, vamos nos focalizar sobre os interruptores térmicos de gás de troca.

### 3.1 Interruptor térmico a gás de troca

Este tipo de interruptor térmico usa a modificação de pressão do gás, que existe entre os blocos, de modo a conseguir alternar entre o estado ligado e desligado. Os blocos são feitos de um material de elevada condutividade térmica.

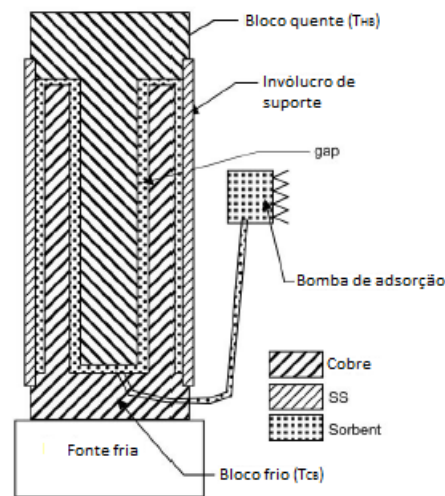


Figura 3.1: Esquema de um interruptor térmico a gás de troca com carvão activado[14].

O seu funcionamento é muito simples: quando existe uma pressão relativamente elevada do gás (regime viscoso) dentro do interruptor, a condução térmica do gás é relativamente elevada e a transferência de calor entre os dois blocos é eficaz, sobretudo se o *gap* entre os dois blocos é pequeno (estado ligado), mas se a pressão do gás for baixa (regime molecular) estamos perante o estado desligado, i.e, a condutividade do gás diminui com a pressão, algo que no estado inverso não acontece. Ao conseguir obter pressões muito baixas a condutância será então muito reduzida.

A pressão gás dentro do interruptor é controlada de duas formas. Pode ser utilizado um mecanismo de alimentação complementado por uma bomba externa, ou usar carvão ativado, (figura 3.1), em que as suas propriedades de adsorção permitem bombear até pressões muito baixas ( $< 10^{-5}$  mbar), ou expelir o gás consoante a temperatura do carvão.

### 3.2 Transferência de calor

Quando há troca de energia térmica entre dois corpos (ou sistemas) de diferentes temperaturas, designa-se **transferência de calor**. A transferência de calor pode ser através de condução, convecção ou radiação.

No caso dos interruptores térmicos, o modo de transferência mais relevante será o da condução. A transferência de calor, através de condução, poderá ser feita em sólido e em gases. Estas duas opções serão abordadas de seguida, em particular a condução em gases que intervém na condução do interruptor térmico.

A condutividade térmica,  $k$ , é a grandeza que indica a capacidade do material de conduzir energia térmica e é uma característica específica de cada material. Esta grandeza relaciona-se com a capacidade térmica volumica  $C$ , com o livre percurso médio  $\lambda$  e com

a velocidade média das partículas  $\bar{v}$ , e é descrita pela equação 3.1.

$$k = \frac{1}{3} C \bar{v} \lambda \quad (3.1)$$

A transferência de calor por condução térmica é descrita pela lei de *Fourier* [15]. A equação (3.2) descreve o fluxo transportado a uma dimensão,  $q''$ .

$$q'' = \frac{\dot{Q}}{S} = -k \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (3.2)$$

### 3.2.1 Condução térmica em sólidos

Tendo por base a equação 3.2, as extremidades do material estarão a temperatura constante, então o calor transferido por unidade de tempo,  $\dot{Q}$ , será descrito por,

$$\dot{Q} = k \frac{S}{L} (T_x - T_y) \quad (3.3)$$

onde  $S$  é a secção transversal ao fluxo de calor e  $L$  é a distância entre as extremidades do cilindro. Esta equação apenas é válida se  $k$  for constante entre  $T_x - T_y$ , em que  $T_x$  e  $T_y$  são as temperaturas das extremidades.

A equação 3.3 pode ser escrita quer em função da condutância térmica,  $K$ , quer em função da resistência térmica  $R$ ,

$$\dot{Q} = K(T_x - T_y) = \frac{1}{R} (T_x - T_y) \quad (3.4)$$

Apesar destas equações servirem para quando  $k$  é constante, há que ter em conta que geralmente isso não acontece, porque  $k$  depende da temperatura, portanto é necessário que  $k(T)$  seja integrado entre  $T_x$  e  $T_y$ . Assim a equação do calor transferido por unidade de tempo é:

$$\dot{Q} = \frac{S}{L} \int_{T_y}^{T_x} k(T) \cdot dT \quad (3.5)$$

### 3.2.2 Condução térmica em gases

A condução térmica em gases depende dos três tipos de regimes de fluxo são eles: o viscoso, o molecular e o intermédio. No nosso caso, os regimes que interessam no nosso interruptor são o **viscoso** e **molecular**, como descrito na figura 3.2. Para saber identificar em qual regime se encontra o gás é necessário saber a relação entre o livre percurso médio,  $\lambda$ , i.e, a distância média percorrida por uma molécula entre colisões e a distância entre as duas extremidades  $x$  e  $y$ ,  $\delta$ .

O gás encontra-se no regime viscoso quando  $\lambda$  é muito menor comparado com  $\delta$  ( $\lambda \ll \delta$ ). Neste regime as partículas de gás colidem umas com as outras, levando a uma transferência de calor mais eficiente (elevada condutância). Esta elevada condutância deve-se ao

facto das partículas mais frias estarem a receber uma constante energia transferida pelas partículas mais quentes.

O gás encontrar-se-á no regime molecular quando  $\lambda$  é muito maior comparado com  $\delta$  ( $\lambda \gg \delta$ ). Neste regime a condutância é muito baixa, visto que as partículas em vez de colidirem umas com as outras, como no regime anterior, colidem sim com as paredes porque viajam uma maior distância sem colidirem com outras partículas. Quando o número de partículas diminui, a transferência de calor diminui também.

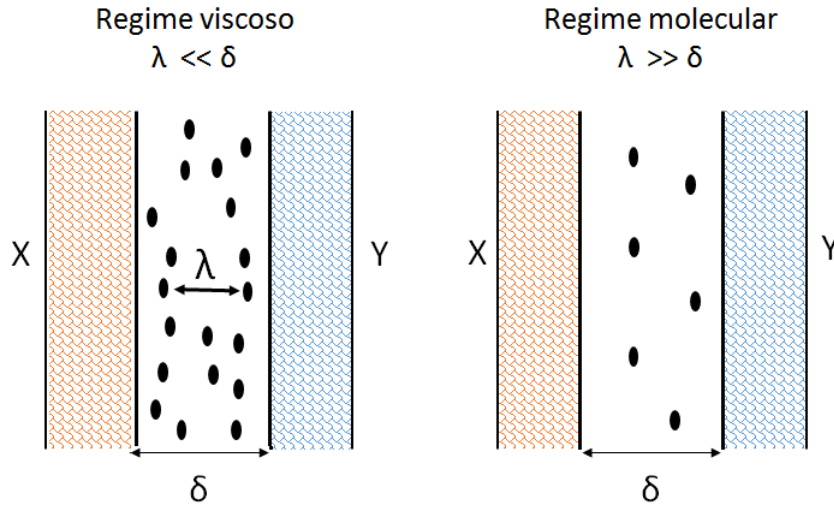


Figura 3.2: Regimes da condução térmica em gases: viscoso e molecular, adaptado de [16].

O livre percurso médio, através da teoria da cinética dos gases, pode ser descrito por,

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma} \quad (3.6)$$

onde  $n$  é o número de moléculas por unidade de volume e  $\sigma$  a secção eficaz de colisão. Para um gás ideal,  $n$  da equação 3.6 adquire um valor de:

$$n = \frac{N_A P}{R_g T} \quad (3.7)$$

onde  $T$  é a temperatura,  $P$  a pressão,  $N_A$  o número de *Avogadro* e  $R_g$  a constante dos gases ideais.

### 3.2.2.1 Regime viscoso

Tal como antes referido, no regime viscoso a condutividade térmica é elevada. A equação 3.8 relaciona a massa molar com a condutividade térmica, mostrando que para moléculas

mais leves mais alta será a condutividade.

$$k = \frac{1}{3N_A\sigma} \sqrt{\frac{3R_g T}{M}} C_{mol} \quad (3.8)$$

onde  $C_{mol}$  é a capacidade térmica molar e  $M$  a massa molar.

Devido à dificuldade na obtenção de  $\sigma$ , para calcular o livre percurso médio utiliza-se a equação 3.9 que está relacionada com a viscosidade,  $\eta(T)$ , e que irá permitir saber qual o regime, sabendo  $\lambda$  [17].

$$\lambda = 3.62 \frac{\eta(T)}{P} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (3.9)$$

Como este regime se caracteriza pela elevada condutância, corresponde então ao estado ON do interruptor térmico.

### 3.2.2.2 Regime molecular

Este regime corresponde ao estado OFF do interruptor, devido à sua baixa condutância. Neste regime a pressão é proporcional ao fluxo e independente da dimensão do sistema, algo que não acontece no regime viscoso, tal como mostra a equação 3.10 [16].

$$\dot{Q} \propto \frac{P}{\sqrt{TM}} S \Delta T \quad (3.10)$$

Pela teoria da cinética dos gases a fluxo no regime molecular é descrito por:

$$\dot{Q} = \alpha S \left( \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \right) \sqrt{\frac{R}{8\pi M T}} P \Delta T \quad (3.11)$$

onde  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ , i.e,  $\gamma$  é a razão entre as capacidades caloríficas a pressão ( $c_p$ ) e volume ( $c_v$ ) constante.  $\alpha$  corresponde ao coeficiente de acomodação e caracteriza o comportamento das partículas de gás nas colisões com uma superfície sólida ou líquida, neste caso em particular, será nas colisões com a parede.

É importante ter conhecimento das propriedades dos materiais utilizados na concepção do interruptor térmico.

Na construção dos blocos é desejado um bom condutor térmico, como por exemplo o cobre, para que não seja posta em causa a condutância dos gases no *gap* a uma condutância térmica elevada, no caso do estado ligado.

No estado desligado do interruptor térmico é desejado um condutor térmico de reduzida condutância, como por exemplo o aço inoxidável, para a fabricação do invólucro de suporte, que permanece como o único caminho de condução, uma vez que o gás é removido do *gap*.

A condutância no estado ligado do interruptor é proporcional à condutividade do gás que se encontra no *gap* entre os blocos de cobre. A condutância no estado desligado

do interruptor é proporcional à condutância do invólucro de aço inoxidável. Uma vez que a quantidade existente no interruptor é desprezável, portanto não contribui para a condução.

## ANÁLISE TÉRMICA DE SISTEMAS CRIOGÉNICOS REDUNDANTES

Este capítulo descreve os modelos térmicos utilizados nos diferentes sistemas (simples, redundante sem interruptores e redundante com interruptores). Estes modelos permitem escrever as equações que serão utilizadas no programa criado.

### 4.1 Sistema simples

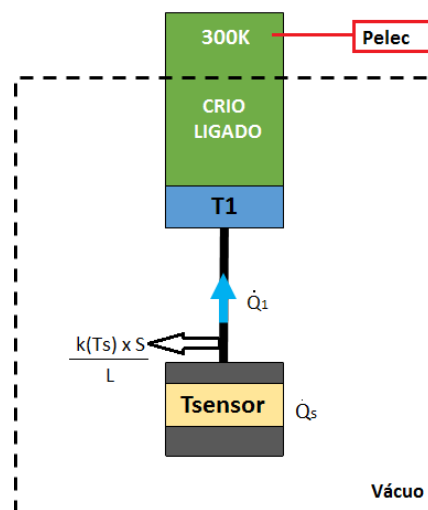


Figura 4.1: Esquema de um criorefrigerador termicamente acoplado a um sensor.

O sistema mais simples para arrefecer os sensores consiste num criorefrigerador acoplado a um sensor por uma ligação térmica, geralmente uma ligação de cobre (figura 4.2), esquematizado na figura 4.1.

Tal como referido anteriormente, a missão será interrompida assim que o criorefrigerador deixar de funcionar, porque não há nenhum componente alternativo no sistema que permita a continuação da missão.

O cálculo das condutâncias é feito pela equação 4.1, onde  $S_X$  é a secção transversal do material,  $L_X$  o seu comprimento,  $k_X(T)$  representa a condutividade do material a uma certa temperatura.

$$K_X = \frac{k_X(T) \times S_X}{L_X} \quad (4.1)$$

A condutividade do cobre pode ser calculada através da equação 4.2.

$$k = 10 \frac{a + cT^{0.5} + eT^1 + gT^{1.5} + iT^2}{1 + bT^{0.5} + dT^1 + fT^{1.5} + hT^2} \quad (4.2)$$

onde os coeficientes de  $a$  a  $i$  são os coeficientes retirados do *National Institute of Standards and Technology* (NIST) [18] e são diferentes conforme o seu nível de pureza.

No caso dos elementos de cobre, que são bons condutores térmicos, a diferença de temperatura entre as extremidades não é muito elevada, o que permite utilizar o valor da condutividade à temperatura de uma das extremidades ou à temperatura média, sem seja necessário utilizar o integral de condutividade térmica.



Figura 4.2: Ligação de cobre [19].

No nosso modelo, e no caso deste sistema, vamos supor que toda a potência dissipada pelo sensor é evacuada pelo criorefrigerador, considerando que não há perdas térmicas.

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_S = \frac{k(T_S) \times S_1}{L_1} \times (T_S - T_1) \quad (4.3)$$

Na equação 4.3 a condutância do cobre é definido por  $\frac{k(T_S) \times S_1}{L_1}$ , onde a condutividade é calculada a uma temperatura de sensor,  $T_S$ .

No espaço, a potência elétrica consumida pelo funcionamento do compressor é limitada e a equação, que relaciona a potência elétrica com a potência frigorífica, foi fornecida pelo Engº Diogo Lopes e resulta de experiências feitas num criorefrigerador do tipo Pulse-Tube na *Air Liquide* (Grenoble, França), descrita pela equação 4.4 [20]. Uma



#### 4.2. SISTEMA DE DOIS CRIORREFRIGERADORES REDUNDANTES SEM INTERRUPTORES TÉRMICOS

condição importante sobre todo este trabalho é que a **potência elétrica não poderá ser superior a 165 W**.

$$P_{elec} = \frac{(\dot{Q}_1 - (A \times T_1) + B)}{((C \times T_1) - D)} \quad (4.4)$$

### 4.2 Sistema de dois criorefrigeradores redundantes sem interruptores térmicos

Como explicado anteriormente, um método eficaz de evitar a paragem da missão em caso de avaria, é acrescentando um segundo criorefrigerador, montado em paralelo, que estará parado até ao momento em que o criorefrigerador ligado deixe de funcionar.

Este sistema tem o problema do calor parasita, proveniente do criorefrigerador parado, que influencia a eficiência do mesmo e a potência frigorífica disponível, i.e, quanto maior for esse calor menor será a potência total disponível, diminuindo assim a eficiência.

A partir do momento que o criorefrigerador que estava outrora parado, começa a funcionar devido à avaria do seu homólogo, o sensor passa a ser arrefecido pelo criorefrigerador, que passou do estado parado para o ligado. Na figura 4.3 está esquematizado este sistema.

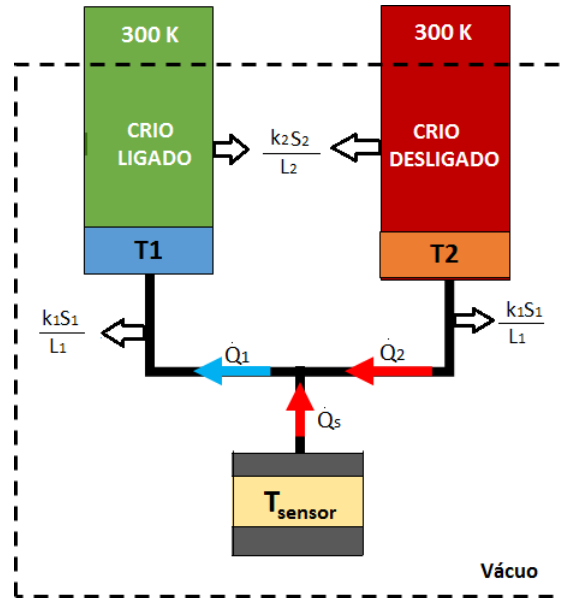


Figura 4.3: Esquema de Sistema de dois criorefrigeradores redundantes sem interruptores térmicos.

O dedo frio do criorefrigerador parado estará a uma temperatura mais elevada do que o que estará em funcionamento, e a sua temperatura variará entre a temperatura ambiente (300 K) e a temperatura do dedo frio,  $T_2$ , sendo a potência que o atravessa descrita pela equação 4.5. Como, nesta parte do sistema, o fluxo é pequeno na ligação de

cobre, pode-se considerar  $T_2 = T_S$ . Esta aproximação será sempre utilizada.

$$\dot{Q}_2 = \frac{k(\bar{T}) \times S_2}{L_2} \times (300 - T_2) \quad (4.5)$$

Em primeira aproximação os tubos metálicos que contêm os criorefrigeradores serão a maior fonte de calor. O calor parasita que provém do criorefrigerador parado é então representado por  $\dot{Q}_2$  na equação 4.5, onde  $k(\bar{T})$  é a condutividade dos tubos à temperatura média  $\left(\frac{300+T_2}{2}\right)$ .  $S_2$  e  $L_2$  são a secção e comprimento dos tubos, respectivamente.

A condutividade dos tubos metálicos é calculada através da equação 4.6.

$$k = 10^{a+b(\log_{10} T)+c(\log_{10} T)^2+d(\log_{10} T)^3+e(\log_{10} T)^4+f(\log_{10} T)^5+g(\log_{10} T)^6+h(\log_{10} T)^7+i(\log_{10} T)^8} \quad (4.6)$$

tal como na equação 4.2, os coeficientes de  $a$  a  $i$  são os coeficientes retirados (NIST) [18], diferindo conforme o material dos tubos.

Quanto maior for potência  $\dot{Q}_2$  menor será a potência frigorífica disponível para o sensor, tal como descrito na 4.7.

É importante referir que apenas a perda térmica proveniente do criorefrigerador parado está a ser tomada em consideração.

$$\dot{Q}_S = \dot{Q}_1 - \dot{Q}_2 \quad (4.7)$$

O gradiente térmico na ligação de cobre pode ser calculado pelo equação 4.8.

$$\dot{Q}_1 = \frac{k(T)_1 \times S_1}{L_1} \times (T_S - T_1) \quad (4.8)$$

Como indicado em [2], a perda térmica pode contribuir para 30% da potência frigorífica disponível. Uma maneira de diminuir essa percentagem é descrito na secção seguinte.

### 4.3 Sistema de dois criorefrigeradores redundantes com interruptores térmicos

#### 4.3.1 Caso geral

O sistema ideal seria uma combinação entre o primeiro caso e o caso anterior, i.e, o ideal seria que a potência frigorífica fosse igual à potência do sensor, tal como acontece no primeiro caso, e que quando um criorefrigerador deixasse de funcionar houvesse uma forma de continuar com a missão, como acontece no caso anterior. Para tal acontecer é necessário diminuir o calor parasita, ou seja, diminuir a potência proveniente do criorefrigerador desligado. Uma solução passa pela introdução de dois interruptores térmicos acoplados aos criorefrigeradores, tal como apresentando na figura abaixo.

#### 4.3. SISTEMA DE DOIS CRIOREFRIGERADORES REDUNDANTES COM INTERRUPTORES TÉRMICOS

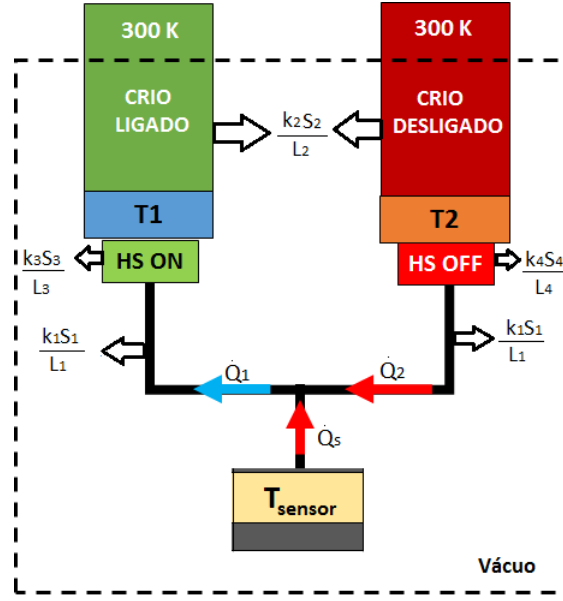


Figura 4.4: Esquema de um sistema de dois criorefrigeradores redundantes com interruptores térmicos.

Ao introduzir os interruptores algumas das equações do caso anterior são modificadas. A equação 4.7 mantém-se a mesma, visto que é diferença de potências, e na sua expressão as condutâncias dos interruptores não é especificada, mas nas outras, nomeadamente na 4.8, há ter em conta as condutâncias dos interruptores em série com os elementos de cobre. Ao incluí-los não interessa apenas a condutância da ligação, como acontece em 4.8. Neste caso a condutância equivalente é igual à soma dos inversos das condutâncias.

A equação 4.8 é modificadas e as potências que atravessam o criorefrigerador em funcionamento e parado podem ser calculadas utilizando as equações 4.9 e 4.10, respetivamente.

$$\dot{Q}_1 = \left( \frac{k_1 k_3 S_1 S_3}{L_1 k_3 S_3 + L_3 k_1 S_1} \right) \times (T_s - T_1) \quad (4.9)$$

$$\dot{Q}_2 = \left( \frac{k_1 k_4 S_1 S_4}{L_1 k_4 S_4 + L_4 k_1 S_1} \right) \times (T_2 - T_s) \quad (4.10)$$

A equação 4.5 é usada tanto para este sistema como para o sistema redundante sem interruptores, porque esta expressão está relacionada com a potência que passa entre a temperatura ambiente, neste caso 300 K e o dedo frio do criorefrigerador.

##### 4.3.2 Caso com interruptores térmicos de gás de troca

###### Passividade

Tal como referido no capítulo 2, este sistema carece de uma falha relativa à autonomia.

Para se conseguir obter a autonomia total do sistema, sem que seja necessário um apoio externo para trocar o modo do interruptor no momento de falha do criorefrigerador,

pode-se utilizar interruptores de gás de troca (capítulo 3). Cada interruptor tem uma bomba criogénica acoplada a cada um dos criorefrigeradores, como se vê na figura 4.5.

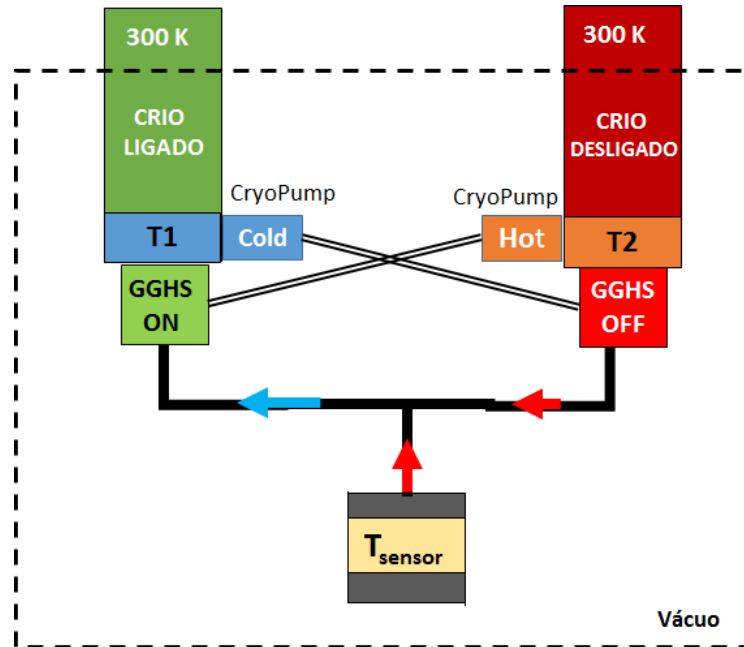


Figura 4.5: Sistema de dois criorefrigeradores redundantes com interruptores térmicos com bomba criogénica acoplada a cada criorefrigerador.

De modo a garantir o estado desligado do interruptor, é necessário que o gás seja todo adsorvido pela bomba criogénica. Para que haja adsorção total do gás, a bomba precisa de estar acoplada ao criorefrigerador que se encontra a uma temperatura mais baixa.

Por outro lado, para conseguir uma elevada condução térmica no estado ligado, é necessário que haja gás dentro interruptor e para tal acontecer é preciso que a bomba esteja acoplada ao criorefrigerador que se encontra a uma temperatura mais elevada.

#### 4.3.2.1 Modelo térmico do interruptor térmico

Neste trabalho, escolheu-se um interruptor térmico de gás de troca de forma cilíndrica. Para calcular a razão  $S/L$  do interruptor térmico é necessário conhecer as secções que o caracterizam, como descrito nas figuras 4.6 e 4.7.

#### 4.3. SISTEMA DE DOIS CRIOREFRIGERADORES REDUNDANTES COM INTERRUPTORES TÉRMICOS

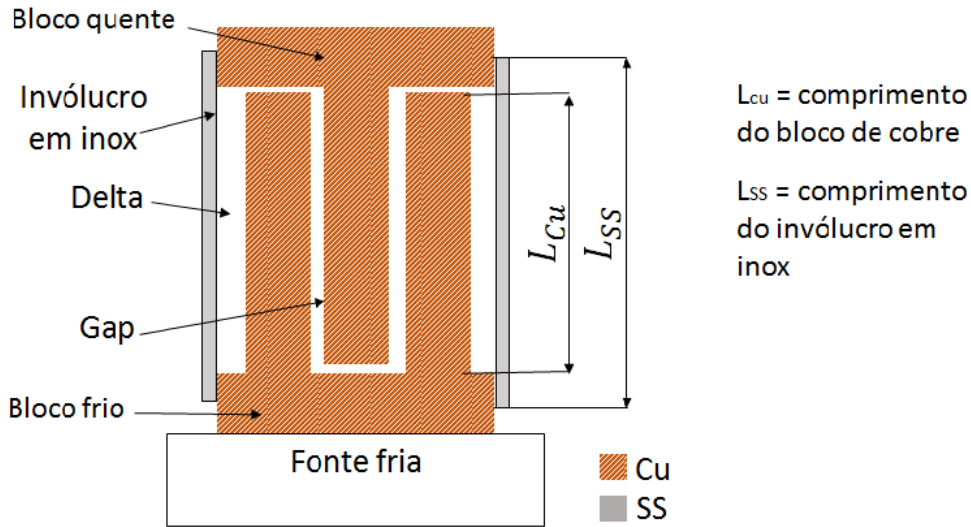


Figura 4.6: Vista frontal do interruptor térmico, adaptado de [16].

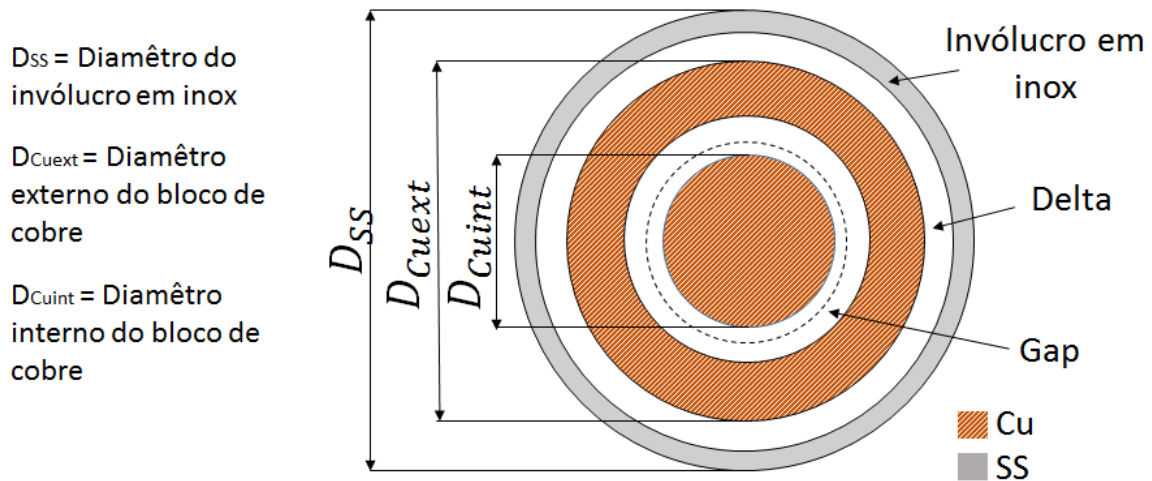


Figura 4.7: Vista superior do interruptor térmico, adaptado de [16].

Para evitar o utilizador de definir tudo, construiu-se um interruptor térmico de gás de troca a partir de dimensões importantes, como o *gap*, o *delta* e o diâmetro, comprimento e espessura do invólucro, que é fabricado em aço inoxidável. Com essas dimensões e utilizando as equações 4.11, 4.12 e 4.13 é possível calcular as restantes dimensões. As dimensões do cobre estão relacionadas com as dimensões do invólucro de aço inoxidável, tal como descrito em 4.11, onde representa o diâmetro externo do bloco de cobre.

$$D_{Cuext} = D_{SS} - (2 \times e_{SS}) - (2 \times \delta) \quad (4.11)$$

Utilizando a equação 4.12 em conjunto com a equação 4.13 calcula-se a espessura do

bloco de cobre,  $e_{Cu}$ , e o diâmetro interno do mesmo,  $D_{Cu\text{int}}$ . A equação 4.13 é obtida impondo a igualdade entre as secções dos dois blocos de cobre.

$$D_{Cu\text{ext}} = D_{Cu\text{int}} + (2 \times e_{Cu}) + (2 \times gap) \quad (4.12)$$

$$\frac{\pi}{4} \times (D_{Cu\text{ext}}^2 - (D_{Cu\text{ext}} - e_{Cu})^2) = \frac{\pi}{4} \times D_{Cu\text{int}}^2 \quad (4.13)$$

### Estado Ligado

A equação 4.9 está relacionada com o estado ligado do interruptor, sendo a condução feita através do *gap* (ilustrada em 4.6 e 4.7) que existe entre os blocos, fabricados em cobre. Para isso é necessário e importante saber quais as suas dimensões. Sabendo os valores do diâmetro interno do cobre e os valores do comprimento do bloco de cobre,  $L_{Cu}$ , e do *gap*, é então possível calcular a área da secção transversal, através da qual passa o fluxo de calor no estado ligado :

$$S = \pi \times L_{Cu} \times \phi gap = \pi \times L_{Cu} \times (D_{Cu\text{int}} + \frac{gap}{2}) \quad (4.14)$$

$L_{Cu}$  pode ser considerado igual ao comprimento do invólucro de aço inoxidável ( $L_{SS}$ ), porque a diferença entre os dois é mínima.

É então assim possível calcular 4.9, em que  $L$  é igual ao valor de *gap* e em que  $k$  será a condutividade do gás que se encontra dentro do interruptor térmico.

Por várias razões, (otimização da condução térmica, propriedades de adsorção), para  $T < 100$  K, os gases utilizados nestes tipos de interruptores são:

- Hidrogénio
- Hélio
- Azoto
- Néon

Utilizando os dados fornecidos pelo *NIST* [21] realizou-se, para cada um dos gases referidos, um *fit* das suas condutividades térmicas. O gráfico que representa o *fit* dos gases referidos está ilustrado na figura 4.8 . Nas tabelas A.1, A.2, A.3 e A.4 estão representados os erros relativos dos *fits* do hidrogénio, hélio, azoto e néon, respectivamente, em relação aos dados que o *NIST* fornece [21], a uma pressão de 1 bar. O erro relativo é calculado através de  $E_{\text{relativo}} = \frac{\text{ValorTerico} - \text{ValorObtido}}{\text{ValorTerico}}$  e será em valor absoluto.

Estes *fits* vão permitir calcular a condutância do interruptor térmico no modo ligado, em conformidade com o gás que se encontrar no seu interior.

#### 4.3. SISTEMA DE DOIS CRIOREFRIGERADORES REDUNDANTES COM INTERRUPTORES TÉRMICOS

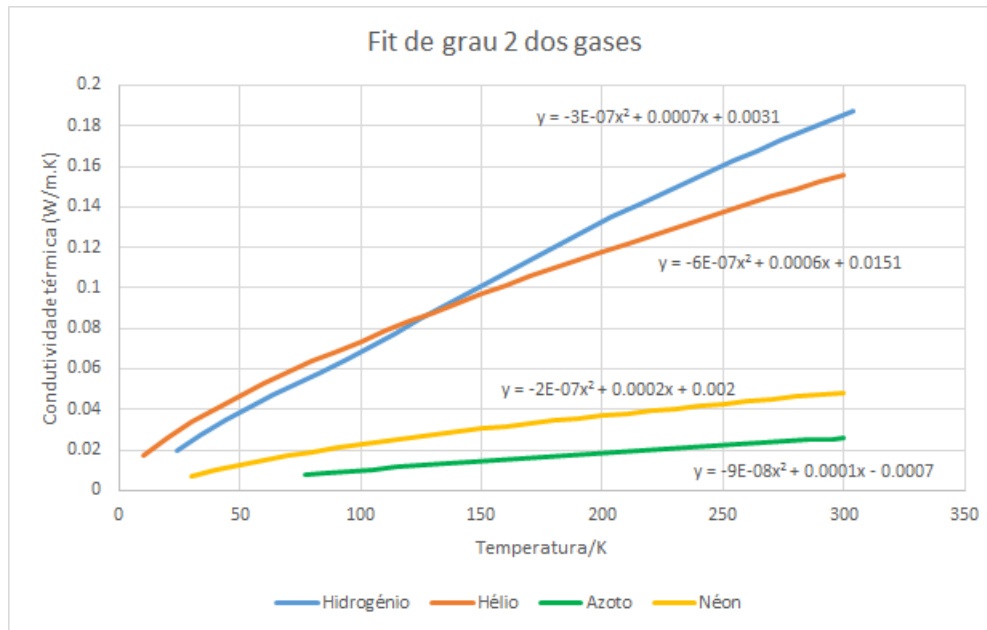


Figura 4.8: Condutividade térmica do Hidrogénio, Hélio, Azoto e Néon a uma pressão de 1 bar e respetivos *fits* de grau 2 utilizados no programa do Java™.

Pelas tabelas relativas a cada gás constata-se que o erro relativo nunca é superior a 15 % e permite assim um *fit* fiável limitado ao grau 2.

#### Estado Desligado

Para o estado desligado, a condução é feita através do invólucro de aço inoxidável e é utilizada a equação 4.10. Neste modelo térmico não foi considerada a transferência de calor por radiação. Neste caso a secção transversal,  $S$ , é dada por :

$$S = \pi \times D_{SS} \times e_{SS} \quad (4.15)$$

No cálculo de  $\frac{S}{L}$  o valor de  $L$  será então o valor do comprimento do invólucro,  $L_{SS}$ .

Pela figura 4.9 constata-se que  $T_2$  está relacionado com a temperatura do dedo frio do criorefrigerador. Esta temperatura é necessária para o cálculo da potência que atravessa o criorefrigerador parado.

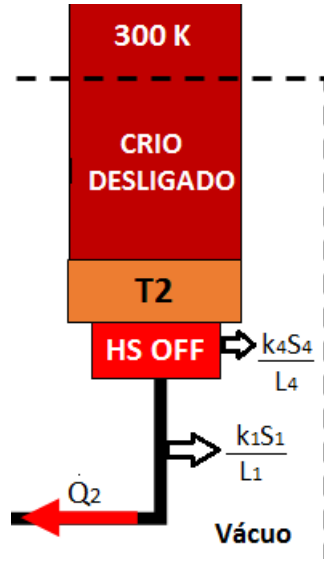


Figura 4.9: Esquemático do criorefrigerador parado acoplado ao interruptor térmico desligado.

A potência que atravessa o criorefrigerador parado,  $\dot{Q}_{SS}$ , é igual a potência que atravessa o interruptor térmico,  $\dot{Q}_{HS}$ , como descrito em 4.16.

$$\dot{Q}_2 = \dot{Q}_{SS} = \dot{Q}_{HS} \quad (4.16)$$

Para obter o valor da temperatura  $T_2$  foram considerados três métodos de cálculo. Um dos métodos consiste em um método analítico, descrito na equação 4.17.

$$\left(k(\bar{T})\frac{S}{L}\right)_{SS} \times (300 - T_2) = \left(k(\bar{T})\frac{S}{L}\right)_{HS} \times (T_2 - T_s) \quad (4.17)$$

Neste método as condutividades, quer do interruptor no estado desligado, quer do criorefrigerador, são calculadas a uma temperatura média.

Um outro método de obter a temperatura  $T_2$ , é através de uma equação empírica, descrita 4.18. Na equação 4.18,  $K$  representa uma condutância fornecida em [20].

$$K(300 - T_2) = k(\bar{T}) \times \frac{S}{L} \times (T_2 - T_s) \quad (4.18)$$

A equação 4.19 descreve o terceiro método, e consiste inicialmente no cálculo da potência do criorefrigerador parado utilizando o integral da condutividade térmica.

$$\frac{S}{L} \int_{T_2}^{300} k dT = \frac{S}{L} \int_{T_s}^{300} k dT - \frac{S}{L} \int_{T_s}^{T_2} k dT \quad (4.19)$$

De modo a simplificar o cálculo da potência, o integral da condutividade térmica pode ser escrito sob a forma de um polinômio de segundo grau, e a equação anterior pode ser reescrita pela equação 4.20,

$$\dot{Q}_2 = f(300) - f(T_2) = a \times 300^2 + b \times 300 + c - (a \times T_2^2 + b \times T_2 + c) = a(300^2 - T_2^2) + b(300 - T_2) \quad (4.20)$$



### 4.3. SISTEMA DE DOIS CRIOREFRIGERADORES REDUNDANTES COM INTERRUPTORES TÉRMICOS

---

Para calcular a temperatura  $T_2$ , usando este método, é preciso utilizar a equação 4.21, sabendo as implicações explicadas pelas equações anteriores.

$$a(300^2 - T_2^2) + b(300 - T_2) = k(\bar{T}) \times \frac{S}{L} \times (T_2 - T_S) \quad (4.21)$$

Todos os métodos actuam como um *solver*, que têm a inicialização a uma temperatura igual à do sensor, com o limite igual a 300 K (temperatura ambiente), sendo incrementada de 1 em 1 K, até que a 4.16 seja satisfeita.

Com este conjunto de equações consegue-se calcular em todos os pontos a temperatura e os fluxos de calor. No capítulo seguinte, será mostrado como este sistema foi implementado num programa Java<sup>TM</sup>.



## IMPLEMENTAÇÃO EM JAVA™

### 5.1 História do Java™

A linguagem Java™ foi desenvolvida na década de 90 por uma equipa de programadores liderada por James Gosling. Foi desenvolvida na empresa *Sun Microsystems*. É uma linguagem de programação orientada a objectos e é compilada por um *bytecode* que é executado por uma máquina virtual [22].

A orientação a objetos é um modelo de análise, projeto e programação de sistemas de software baseado na composição e interação entre diversas unidades de software chamadas de objetos [23].

A linguagem de programação Java™ é actualmente a linguagem de programação mais utilizada e popular do mundo [24].

### 5.2 Redundant Cryocoolers Simulations

De modo a que seja possível estudar todas as configurações foi feito um programa, intitulado *Redundant Cryocoolers Simulation (RCS)* que engloba as três configurações descritas no capítulo anterior.

O programa foi feito na linguagem de programação Java™ utilizando o ambiente de desenvolvimento integrado *Netbeans* na sua concepção. Foi escolhido o *Netbeans* devido a uma maior facilidade na criação da interface gráfica do utilizador, dispondo de ferramentas que permitem criar uma janela com todos os componentes nos locais desejados numa questão de minutos, algo que com outro programa dificilmente seria possível. Inicialmente o programa criado permite ao utilizador escolher duas opções: *condutância fixa* e *condutância variável*.

No modo *condutância fixa* é o utilizador a escolher o valor da condutância dos componentes que constituem o sistema, sem que seja necessário colocar valores de dimensões.

Na opção *condutância variável* o utilizador coloca o valor das dimensões de todos os componentes e qual o seu material.

### 5.2.1 Interface gráfica do utilizador

O programa *Redundant Cryocoolers Simulations*, inicialmente e tal como dito anteriormente, dá a possibilidade ao utilizador de escolher entre a *condutância fixa* e *condutância variável*, como mostra a figura 5.1.

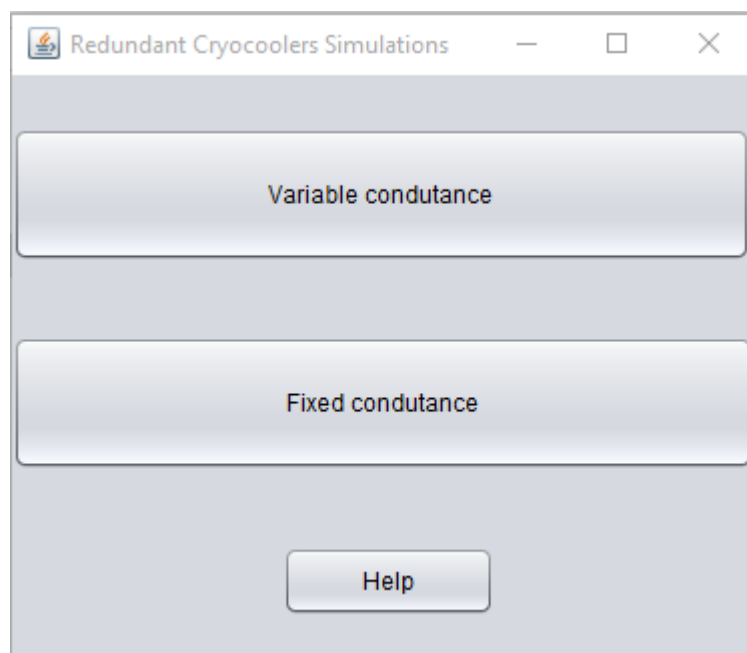


Figura 5.1: Janela inicial do programa RCS.

#### Condutância fixa

Depois de selecionar este modo, é apresentada ao utilizador uma janela igual à da figura 5.2. O primeiro separador é relativo à equação da potência elétrica, que é descrita pela equação 4.4 e aos valores dos coeficientes,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$ , que vêm pré-definidos (tabela 5.1), fornecidos em [20]. Neste separador é possível verificar de que forma se comporta a potência elétrica em função da temperatura do dedo frio ou em função da potência do criorefrigerador em funcionamento.

## 5.2. REDUNDANT CRYOCOOLERS SIMULATIONS

Fixed conductance

Electric power equation | Simple system (config1) | Redundant System without HeatSwitch (config2) | Redundant System with HeatSwitch (config3) | Config3 Tables

Equation

$$P_{elec} = \frac{(P_1 - (A \times T_1) + B)}{((C \times T_1) - D)}$$

A: 0.0457 B: 1.6 C: 5.5E-4 D: 0.014

☐ Increase cooling temperature

P1 (W): 2 T1 min (K): 40 T1 max (K): 60 T1 step (K): 1 Graph

☐ Increase cooling power:

T1 (K): 50 P1 min (W): 0.5 P1 max (W): 3.5 P1 step (W): 0.5 Graph

Home

Figura 5.2: Separador relativo a equação de potência elétrica na opção *condutância fixa*.

Tabela 5.1: Coeficiente utilizados na equação da potência elétrica.

Coeficientes	Valores
A	0.0457
B	1.6
C	5.5E-4
D	0.014

Com os coeficiente pré-definidos a equação 4.4 é a valida para temperaturas de sensor entre 40-60 W e potência frigorífica entre 0.5-3.5 W, considerando 165 W como valor máximo para a potência elétrica, como se pode ver na figura 5.3.

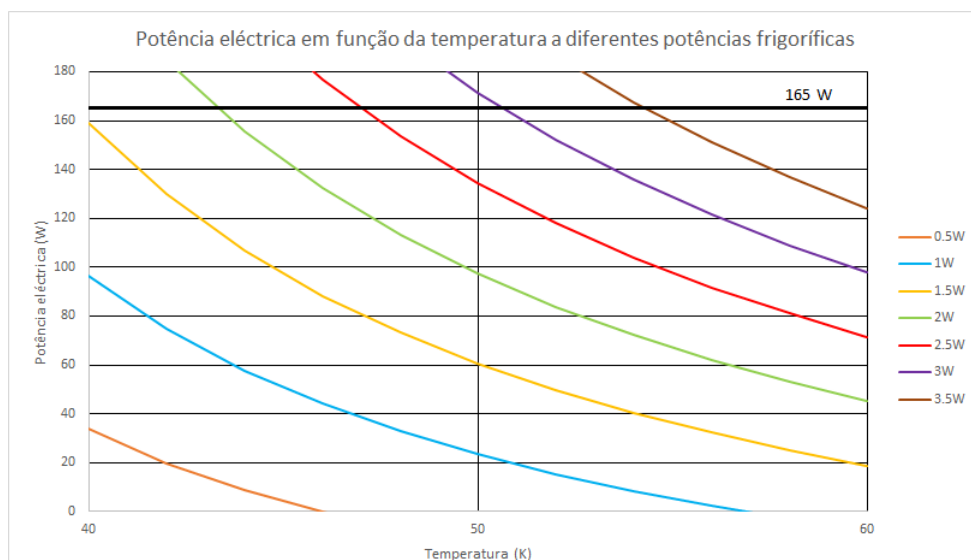


Figura 5.3: Potência eléctrica em função da temperatura a potências frigoríficas compreendidas entre 0.5 e 3.5 W.

Se o utilizador, neste separador, escolher a opção *Increase cooling temperature*, irá obter um gráfico da potência elétrica em função da temperatura de arrefecimento. Se a opção for *Increase cooling power*, irá obter um gráfico da potência elétrica em função da potência frigorífica. Desta maneira o utilizador tem acesso a gráficos que permitem estudar a gama de validade da equação escolhida.

Os outros separadores deste modo dizem respeito a cada uma das configurações. No separador referente à configuração do sistema redundante com interruptores térmicos, representado na figura 5.4, é possível, escolher as condutâncias dos componentes e comparar as três configurações de sistemas. Foi escolhido explicar este modo devido à sua complexidade.

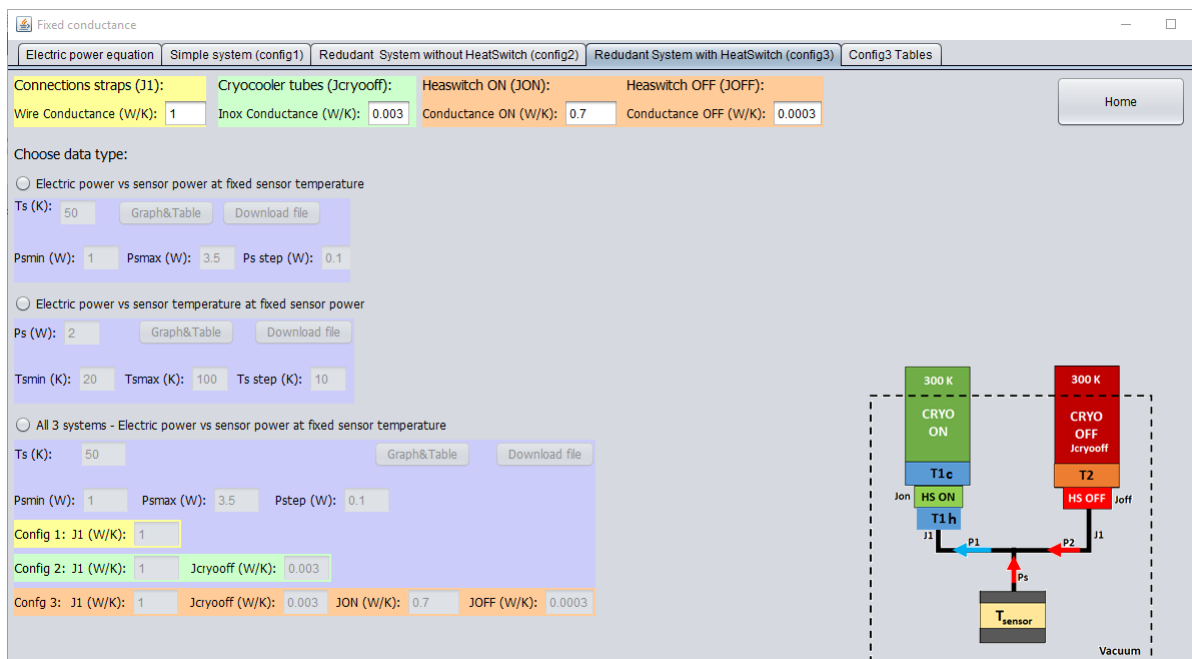


Figura 5.4: Separador relativo à terceira configuração na opção *condutância fixa*.

### Condutância variável

Depois de seleccionar este modo, é apresentado ao utilizar uma janela semelhante à da figura 5.2. Este separador atua de igual forma ao da figura 5.5.

## 5.2. REDUNDANT CRYOCOOLERS SIMULATIONS

Variable conductance

Electric power equation | Simple system (config1) | Redundant System without HeatSwitch (config2) | Redundant System with HeatSwitch (config3) | Config3 Tables | Dimensions HeatSwitch | P2 from cf3: information

Equation

$$P_{elec} = \frac{(P_1 - (A \times T_1) + B)}{((C \times T_1) - D)}$$

A: 0.0457 B: 1.6 C: 5.5E-4 D: 0.014

☐ Increase cooling temperature

P1 (W): 2 T1 min (K): 40 T1 max (K): 60 T1 step (K): 1

☐ Increase cooling power:

T1 (K): 50 P1 min (W): 0.5 P1 max (W): 3.5 P1 step (W): 0.5

Figura 5.5: Separador relativo a equação de potência elétrica na opção *condutância variável*.

Tal como no outro modo, os outros separadores deste modo dizem respeito a cada uma das configurações. A diferença entre os modos é que na *condutância variável* é possível escolher as dimensões dos componentes das configurações e comparar as três configurações. O separador que permite a comparação está representado na figura 5.6. Nessa mesma figura existe secção amarela que representa as dimensões e estado de pureza da ligação de cobre. Existe também um secção verde, que está ilustrado na figura 5.8, e que se refere aos tubos dos criorrefrigeradores.

Variable conductance

Electric power equation | Simple system (config1) | Redundant System without HeatSwitch (config2) | Redundant System with HeatSwitch (config3) | Config3 Tables | Dimensions HeatSwitch | P2 from cf3: information

Straps :

Material: Diameter (mm): 5 Length (mm): 10

Cu\_RRR...

Cryocooler tubes :

Material: OD (mm): 30 ID (mm): 28 Length (mm): 300

SS\_304

Cryocooler Conductance fixed: ☐ Yes ☒ No

aT^2 +bT

Jcryoff (W/m): 0 0.003

(more info in tab "P2 from cf3: information")

Heat Switch

Supporting shell:

Material: Dss (mm): 30 Lss (mm): 30 ess (mm): 0.1

SS\_304

Gap (mm): 0.1 Delta (mm): 0.5

Exchange Gas: Hydrogen

Fit K(T) gas: aT^2 -3E-7 +bT 0.0007 +c 0.0031

Dimensions:

Config3 Dss (mm): Lss (mm): ess (mm): Gap (mm): Delta (mm): Material:

30 30 0.1 0.1 0.5 SS\_304

Exchange Gas: Hydrogen

Fit K(T) gas: aT^2 -3E-7 +bT 0.0007 +c 0.0031

Choose data type:

☐ All 3 systems - Electric power vs sensor power at fixed sensor temperature

Ts (K): 50

P1min (W): 1 P1max (W): 3.5 P1 step (W): 0.1

Connections straps (J1): Cryocooler tubes (Jcryo\_off):

Diameter (mm): Length (mm): Material: OD (mm): ID (mm): Length (mm): Material:

Config1 5 10 Cu\_RRR...

Config2 5 10 Cu\_RRR... 30 28 300 SS\_304

Config3 5 10 Cu\_RRR... 30 28 300 SS\_304

Cryocooler Conductance fixed: ☐ Yes ☒ No Jcryoff (W/m): aT^2 0 +bT 0.003

Heat Switch

Supporting shell

Config3 Dss (mm): Lss (mm): ess (mm): Gap (mm): Delta (mm): Material:

30 30 0.1 0.1 0.5 SS\_304

Exchange Gas: Hydrogen

Fit K(T) gas: aT^2 -3E-7 +bT 0.0007 +c 0.0031

Schematic diagram:

300 K CRYO ON T1c HS ON T1h J1 P1 P2 J1

300 K CRYO OFF Jcryoff T2 HS OFF Toff

Tsensor

Vacuum

Figura 5.6: Separador relativo à terceira configuração na opção *condutância variável*.

O sistema da configuração deste separador está representado na figura 5.7.

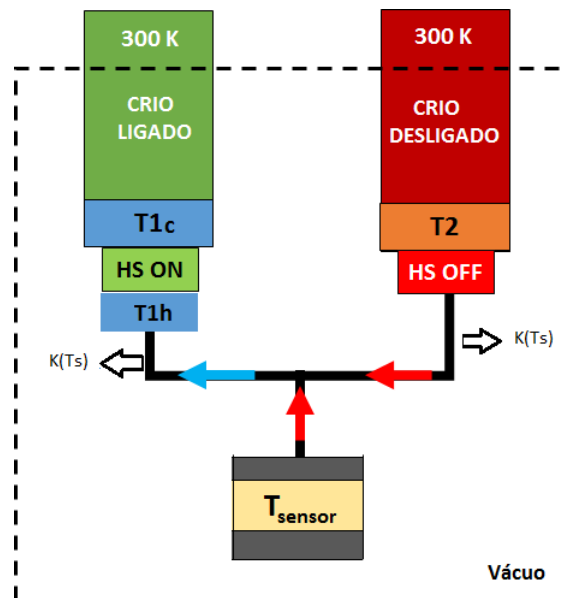


Figura 5.7: Esquema de um sistema de dois criorefrigeradores redudantes com interruptores térmicos, com as temperaturas das extremidades do interruptor evidenciadas.

No RCS é dada a possibilidade de escolher de que forma é feito o calculo da condutância dos tubos, como mostra a figura 5.8. Se o utilizador escolher a opção **Yes** usar-se-á uma condutância definida pelo mesmo. Por outro lado ao escolher a opção **No**, a condutância será calculada através das dimensões e do material do tubo.

Figura 5.8: Secção relativa aos tubos dos criorefrigeradores na terceira configuração na opção *condutância variável*.

Existe também uma última secção referente ao interruptor térmico, (figura 5.9), onde é dada a possibilidade de definir algumas das suas dimensões, bem como o material do invólucro de suporte e qual o gás que se encontra no seu interior.



**Heat Switch**

**Supporting shell:**

Material:

Dimensions:

Dss (mm):  Lss (mm):  ess (mm):

Gap (mm):  Delta (mm):

**Exchange Gas:**

Fit K(T) gas:

Figura 5.9: Secção relativa aos interruptores térmicos na terceira configuração na opção *condutância variável*.

O utilizador, ao seleccionar a opção que permite comparar todas as configurações, obterá um gráfico da potência elétrica em função da temperatura do criorrefrigerador ligado, (figura 5.11), e um gráfico da potência elétrica em função da potência sensor (figura 5.10).

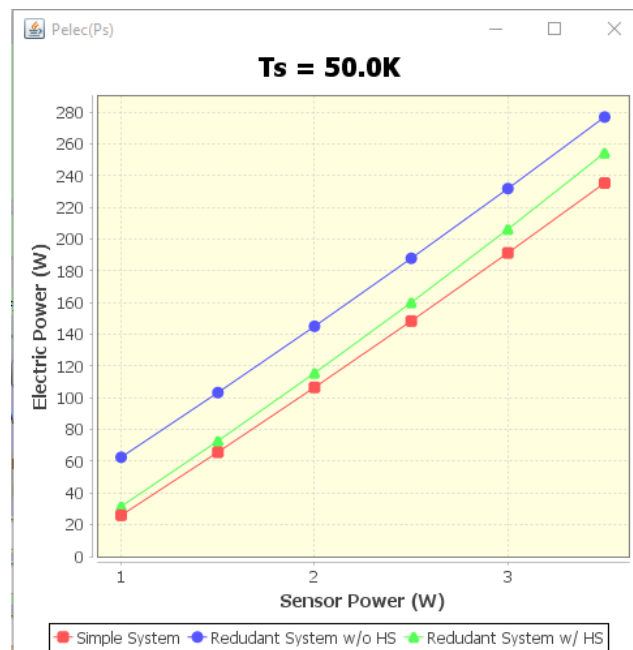


Figura 5.10: Gráfico da potência elétrica em função da potência do sensor de todas as configurações.

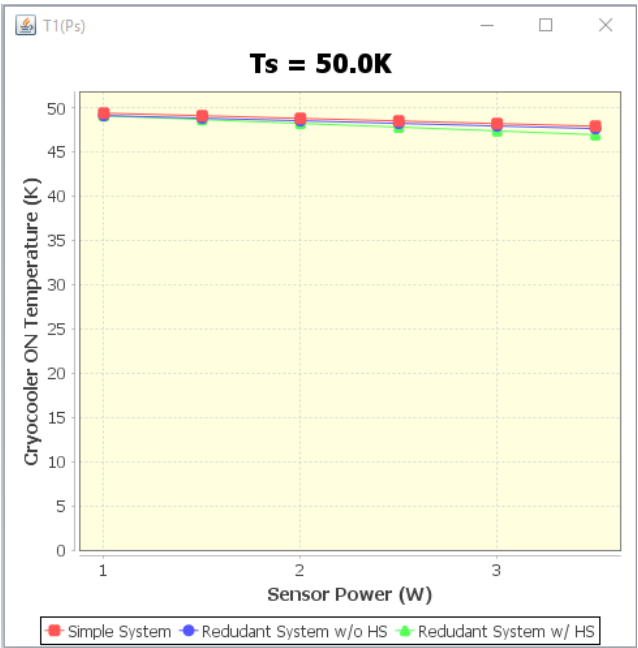


Figura 5.11: Gráfico da potência elétrica em função da temperatura do criorrefrigerador ligado de todas as configurações.

Para além destes gráficos, no separador *Config3 Tables*, irá estar disponível a tabela com os valores calculados, como ilustrado na figura 5.12.

Electric power equation

Simple system (config1)

Redundant System without HeatSwitch (config2)

Redundant System with HeatSwitch (config3)

Config3 Tables

Dimensions HeatSwitch

P2 from cf3: information

Qs/W	Ts/K	K(Ts)(cf...	T1(cf1)/K	Q1 (cf1)/...	Pelec(c...	K(Ts)(cf...	T1(cf2)/K	Q1 cf2)/...	Q2(cf2)/...	T2(cf2)/K	K(T2)(c...	Pelec(c...	K(Ts)(c...	T1h(cf3...	T1c(cf3...	Q1(cf3)/...	Q2(cf3)/...	T2(cf3)/K	Pelec(c...
1.0	50.0	1.7E0	49.41	1.0	25.95	1.7E0	49.14	1.46	0.46	50.0	1.8E-3	62.56	1.7E0	49.38	49.11	1.05	0.054	276.0	31.53
1.5	50.0	1.7E0	49.12	1.5	65.73	1.7E0	48.84	1.96	0.46	50.0	1.8E-3	103.26	1.7E0	49.08	48.68	1.55	0.054	276.0	72.77
2.0	50.0	1.7E0	48.82	2.0	106.52	1.7E0	48.55	2.46	0.46	50.0	1.8E-3	145.01	1.7E0	48.79	48.25	2.05	0.054	276.0	115.56
2.5	50.0	1.7E0	48.53	2.5	148.35	1.7E0	48.25	2.96	0.46	50.0	1.8E-3	187.83	1.7E0	48.49	47.83	2.55	0.054	276.0	160.0
3.0	50.0	1.7E0	48.23	3.0	191.26	1.7E0	47.96	3.46	0.46	50.0	1.8E-3	231.78	1.7E0	48.2	47.4	3.05	0.054	276.0	206.2
3.5	50.0	1.7E0	47.94	3.5	235.29	1.7E0	47.66	3.96	0.46	50.0	1.8E-3	276.89	1.7E0	47.9	46.96	3.55	0.054	276.0	254.26

All 3 Systems - Graphs

X Axis:

Ps

Y Axis:

Ps

Graph

Home

Figura 5.12: Separador relativo à tabelas da configuração da figura 5.6.

Na figura 5.12 rodeado a vermelho está a tabela relativa à configuração simples, que pode ser vista com mais pormenor na tabela 5.2.

### 5.3. OBTENÇÃO DA TEMPERATURA DO CRIOREFRIGERADOR DESLIGADO

Tabela 5.2: Valores de potências e temperaturas do sistema a partir dos parâmetros da figura 5.14 obtidos pelo RCS para a configuração simples.

Ps/W	Ts/K	K(Ts)(cf1)/W.m	T1(cf1)/K	P1(cf1)/W	Pelec(cf1)/W
1.0	50.0	1,7E0	49.41	1.0	25.95
1.5	50.0	1,7E0	49.12	1.5	65.73
2.0	50.0	1,7E0	48.82	2.0	106.52
2.5	50.0	1,7E0	48.53	2.5	148.35
3.0	50.0	1,7E0	48.23	3.0	191.26
3.5	50.0	1,7E0	47.94	3.5	235.29

Rodeado a verde está a tabela relativa à configuração redundante sem interruptores, que pode ser vista com mais detalhe na tabela 5.3. A tabela que é indicada a amarelo na

Tabela 5.3: Valores de potências e temperaturas do sistema a partir dos parâmetros da figura 5.14 obtidos pelo RCS para a configuração redundante sem interruptores térmicos.

Ps/W	Ts/K	K(Ts)(cf2)/W.m	T1(cf2)/K	P1(cf2)/W	P2(cf2)/W	T2(cf2)/K	K(T2)(cf2)/W.m	Pelec(cf2)/W
1.0	50.0	1,7E0	49.14	1.46	0.46	50.0	1,8E-3	62.56
1.5	50.0	1,7E0	48.84	1.96	0.46	50.0	1,8E-3	103.26
2.0	50.0	1,7E0	48.55	2.46	0.46	50.0	1,8E-3	145.01
2.5	50.0	1,7E0	48.25	2.96	0.46	50.0	1,8E-3	187.83
3.0	50.0	1,7E0	47.96	3.46	0.46	50.0	1,8E-3	231.78
3.5	50.0	1,7E0	47.66	3.96	0.46	50.0	1,8E-3	276.89

figura 5.12 pode ser vista com mais pormenor na tabela 5.4.

Tabela 5.4: Valores de potências e temperaturas do sistema a partir dos parâmetros da figura 5.14 obtidos pelo RCS para a configuração redundante com interruptores térmicos.

Qs/W	Ts/K	K(Ts)/W.m	T1h/K	T1c/K	Q1/W	Q2/W	T2/K	Pelec/W
1.0	50.0	1,7E0	49.38	49.11	1.05	0.054	276.0	31.53
1.5	50.0	1,7E0	49.08	48.68	1.55	0.054	276.0	72.77
2.0	50.0	1,7E0	48.79	48.25	2.05	0.054	276.0	115.56
2.5	50.0	1,7E0	48.49	47.83	2.55	0.054	276.0	160.0
3.0	50.0	1,7E0	48.2	47.4	3.05	0.054	276.0	206.2
3.5	50.0	1,7E0	47.9	46.96	3.55	0.054	276.0	254.26

A sigla  $T_{1h}$ , observando a figura 5.7, constata-se que representa a temperatura da extremidade do interruptor térmico que está em contacto com a ligação de cobre.

Observando a figura 5.12, constata-se que existe uma secção semelhante à da figura 5.13. Esta secção apenas está disponível quando o utilizador, no separador da configuração com interruptores térmicos, opta por escolher comparar todos os sistemas. Ao criar a tabela que indica os valores de cada configuração, é possível utiliza-los para criar diferentes gráficos.

### 5.3 Obtenção da temperatura do criorefrigerador desligado

Como já referido, a temperatura do criorefrigerador desligado (ver figura 4.9), tem diferentes métodos de ser calculado. Todos actuam com um pequeno *solver* criado dentro

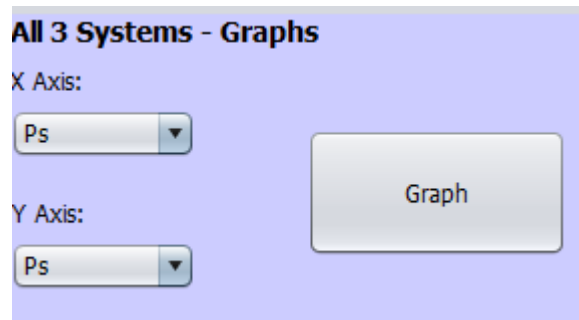


Figura 5.13: Secção do separador ilustrado na figura 5.12.

do programa, porque a linguagem Java™ não é uma linguagem matemática e portanto a melhor solução era cria-lo.

O *solver* inicia-se à temperatura do sensor até à máxima temperatura considerada que se pode atingir no sistema (300 K) em passos de 1 K. A temperatura é encontrada quando a condição em 4.17 é verificada.

## 5.4 Verificação do programa

Como existem muitos cálculos, utilizou-se a tabela 5.4 para verificar a coerência de todos os resultados.

Figura 5.14: Dimensões e parâmetros dos componentes do sistema redundante com interruptores.

Utilizando os parâmetros da figura 5.14 é possível obter os valores das secções transversais e da razão  $\frac{S}{L}$  como se pode verificar pela tabela 5.5

Tabela 5.5: Secção transversal e razão  $\frac{S}{L}$  dos diferentes componentes do sistema.

Componente	$S \text{ (m}^2\text{)}$	$S/L \text{ (m)}$
Ligação de cobre	1.96E-5	1.96E-3
Criorrefrigerador	4.63E-5	1.54E-4
Interruptor ligado	1.05E-2	1.05E+2
Interruptor desligado	6.28E-6	2.09E-5

A coerência dos resultados obtidos, pelo programa, é verificada através das seguintes situações:

- $\Delta T$  no interruptor térmico
- Potência dos criorefrigeradores
- Conservação de energia do sistema

Se todos os valores tiverem em concordância com os valores retirados do programa, então o modelo térmico implementado é válido.

#### 5.4.1 Verificação de $\Delta T$ no interruptor térmico

##### Interruptor no modo ligado

Para a primeira condição usa-se a equação 5.1 para obter o valor do  $\Delta T$  teórico do interruptor térmico no modo ligado.

$$\Delta T_{teorico} = \frac{P_1 \times L}{S \times k_{teorico}(\bar{T})} \quad (5.1)$$

De seguida compara-se o valor de  $\Delta T$  teórico, com o valor  $\Delta T$ , que é obtido pela diferença  $T_{1h} - T_{1c}$ , valores retirados da tabela 5.4. Para obter a condutância teórica foi necessário utilizar os dados de condutividade térmica do hidrogénio (fornecidos pelo NIST [21]) à temperatura média  $\bar{T}$ . Neste caso o valor de  $\bar{T}$  corresponde a  $\frac{T_{1h} + T_{1c}}{2}$ .

Tabela 5.6: Valores para comparação entre  $\Delta$  teórico e  $\Delta$  obtido do interruptor no modo ligado.

$\dot{Q}_1$	$k_{teorico}(T_{1h})$	$\Delta T_{teorico}$	$\Delta T_{obtido}$	Erro relativo (%)
1.05	0.038004	0.26	0.27	2.92
1.55	0.037814	0.39	0.40	2.78
2.05	0.03763	0.52	0.54	4.40
2.55	0.03744	0.65	0.66	2.06
3.05	0.037256	0.78	0.80	2.92
3.55	0.037065	0.91	0.94	3.36

Comparando os valores dos  $\Delta T$  e usando os valores do erro relativo conclui-se que a diferença é mínima. A pequena discrepância deve-se às aproximações feitas.

##### Interruptor no modo desligado

É necessária também verificar o valor de  $\Delta T$  teórico do interruptor térmico no modo desligado. Com esse objectivo utiliza-se a equação 5.2.

$$\Delta T_{teorico} = \frac{\dot{Q}_2 \times L}{S \times k_{teorico}(\bar{T})} \quad (5.2)$$

Com esta equação compara-se o valor de  $\Delta T$  teórico, com o valor  $\Delta T$ , que é obtido pela diferença  $300 - T_2$ , em que 300 será a temperatura ambiente. Para obter a condutância teórica foi necessário utilizar os dados de condutividade térmica do aço inoxidável (fornecidos pelo *NIST* [18]) à temperatura média,  $\bar{T}$ . Neste caso o valor de  $\bar{T}$  corresponde a  $\frac{300+T_2}{2}$ .

Tabela 5.7: Valores para comparação entre  $\Delta$  teórico e  $\Delta$  obtido do interruptor no modo desligado.

$\dot{Q}_2$	$k_{teorico}(\bar{T})$	$\Delta T_{teorico}$	$\Delta T_{obtido}$	Erro relativo (%)
0.054	14.9909	23.32	24.00	2.91

Comparando os valores dos  $\Delta T$  e utilizando o valor do erro relativo, que é inferior a 3 %, conclui-se que o valor teórico é igual ao obtido.

#### 5.4.2 Verificação da potência dos criorefrigeradores

Para além de se verificar as temperaturas, as equações das potências, que atravessam os criorefrigeradores, também tem que ser validadas.

##### Criorefrigerador em funcionamento

Foram usadas as equações 5.3 e 5.4 para se obter a potência que atravessa o criorefrigerador ligado desta configuração.

$$\dot{Q}_1 = K(T_S) \times (T_S - T_{1h}) \quad (5.3)$$

$$\dot{Q}_1 = \left( \frac{S}{L} \right) \cdot k(\bar{T}) \times \Delta T_{tabela} \quad (5.4)$$

$K(T_S)$  é o valor da condutância da ligação de cobre, valor esse retirado de 5.4 e é calculado à temperatura do sensor. O valor da razão  $\frac{S}{L}$ , que está associado ao interruptor térmico ligado, é retirado da tabela 5.5. O valor de  $k(\bar{T})$  é fornecido pelo *NIST* [21] e será o valor da condutividade do hidrogénio a uma temperatura média, que será igual a  $\frac{T_{1h}+T_{1c}}{2}$ .

Tabela 5.8: Valores de potências obtidos e teóricos e erro relativo associado correspondente à equação 5.3.

$\dot{Q}_1$ obtido	$\dot{Q}_1$ teórico	Erro relativo %
1.050	1.054	0.38
1.550	1.564	0.90
2.050	2.057	0.34
2.550	2.567	0.66
3.050	3.060	0.33
3.550	3.570	0.56

Tabela 5.9: Valores de potências obtidos e teóricos e erro relativo associado correspondente à equação 5.4.

$\dot{Q}_1$ tabela	$\dot{Q}_1$ teórico	Erro relativo %
1.050	1.048	0.60
1.550	1.542	0.79
2.050	2.068	0.68
2.550	2.510	1.73
3.050	3.023	1.04
3.550	3.527	0.77

As aproximações utilizadas no programa, para a potência que atravessa o criorrefrigerador em funcionamento, são válidas visto que o erro não ultrapassa os 2 %.

#### Criorrefrigerador parado

Para verificar a potência que atravessa o criorrefrigerador parado foi utilizado a equações 5.5.

$$\dot{Q}_2 = K(\bar{T}) \times (300 - T_2) \quad (5.5)$$

Tabela 5.10: Valores de potências obtidos e teóricos e erro relativo associado correspondente à equação 5.5.

$\dot{Q}_2$ tabela	$\dot{Q}_2$ teórico	Erro relativo %
0.054	0.056	2.83

O valor de  $k(\bar{T})$  é fornecido pelo *NIST* [21] e será o valor da condutividade aço inoxidável à temperatura média.  $T_2$  é o valor da temperatura do dedo frio do criorrefrigerador parado, retirado da tabela 5.4.

As aproximações utilizadas no programa, para a potência que atravessa o criorrefrigerador parado, são válidas visto que o erro não chega sequer a 3 %.

### 5.4.3 Conservação de energia do sistema

Na última situação, se a energia se conservar as equações implementadas no programa são válidas. Para ser verificada a conservação de energia utiliza-se a equação 5.6, em que  $\dot{Q}_1$  representa a potência do criorefrigerador em funcionamento,  $\dot{Q}_2$  é o valor da potência do criorefrigerador parado e  $P_S$  o valor da potência dos sensores (retirados da tabela 5.4).

$$\dot{Q}_1 - \dot{Q}_2 - \dot{Q}_S = 0 \quad (5.6)$$

Utilizando os valores da potência do criorefrigerador ligado e parado da tabela 5.8 obtêm-se a tabela 5.11. O mesmo procedimento se tem para a tabela 5.9, obtendo a tabela 5.12.

Tabela 5.11: Subtração da potências com valor da potência teórica retirado da tabela 5.8.

$\dot{Q}_S$	$\dot{Q}_1$	$\dot{Q}_2$	$\dot{Q}_1 - \dot{Q}_2 - \dot{Q}_S$
1	1.048	0.056	-0.008
1.5	1.542	0.056	-0.014
2	2.068	0.056	0.012
2.5	2.510	0.056	-0.045
3	3.023	0.056	-0.033
3.5	3.527	0.056	-0.029

Tabela 5.12: Subtração da potências com valor da potência teórica retirado da tabela 5.9.

$\dot{Q}_S$	$\dot{Q}_1$	$\dot{Q}_2$	$\dot{Q}_1 - \dot{Q}_2 - \dot{Q}_S$
1	1.054	0.056	-0.002
1.5	1.564	0.056	0.008
2	2.057	0.056	0.001
2.5	2.567	0.056	0.011
3	3.060	0.056	0.004
3.5	3.570	0.056	0.014

Como se pode verificar pela tabela 5.11 a soma de todas potências é sempre zero ou muito próximo de zero, algo que também acontece na tabela 5.12.

Com esta última verificação fica comprovada a validade das equações.

Este conjunto de verificações indica que o programa não contém erros de cálculo. O capítulo seguinte, permite então utiliza-lo para procurar uma solução de otimização para um sistema dado.



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão expostos os resultados retirados do *Redundant Cryocoolers Simulation*, com a finalidade de comparar as três configurações (simples e redundante com ou sem interruptores). Pretende-se também exemplificar como é que a potência elétrica varia com diferentes valores de dimensões e condutâncias do interruptor térmico.

### 6.1 Sistema simples e sistemas redundantes com e sem interruptores térmicos

Serão introduzidos os parâmetros dos sistemas e os valores de dimensões do interruptor térmico iguais aos da figura 6.1.

Ts (K): 50      Graph&Table      Download file  
 P<sub>min</sub> (K): 1    P<sub>max</sub> (W): 3.5    P<sub>s</sub> step (W): 0.5

Connections straps (J1):      Cryocooler tubes (Jcryo\_off):  
 Diameter (mm): Length (mm): Material:      OD (mm): ID (mm): Length (mm): Material:

Config1    5    10    Cu\_RRR...  
 Config2    5    10    Cu\_RRR...    30    28    300    SS\_304  
**Cryocooler Conductance**  
 fixed:    ☐ Yes    ☒ No    Jcryoff (W/m): aT<sup>2</sup> 0    +bT 0.003

5    10    Cu\_RRR...    30    28    300    SS\_304  
 Heat Switch

Dimensions:      Supporting shell  
 Config3    D<sub>ss</sub> (mm): L<sub>ss</sub> (mm): e<sub>ss</sub> (mm): Gap (mm): Delta (mm): Material:  
 24.8    54    0.1    0.1    0.5    SS\_304

Exchange Gas: Hydrogen    Fit K(T) gas: aT<sup>2</sup> -3E-7    +bT 0.0007    +c 0.0031

Figura 6.1: Parâmetros e dimensões do sistema simples e do sistema redundante sem interruptor e do sistema redundante com interruptor. Interruptores com invólucro de diâmetro 24.8 mm e comprimento de 54 mm e temperatura do sensor igual a 50 K.

Com estes parâmetros obteve-se o gráfico da figura 6.2 que relaciona a potência elétrica com a potência do sensor.

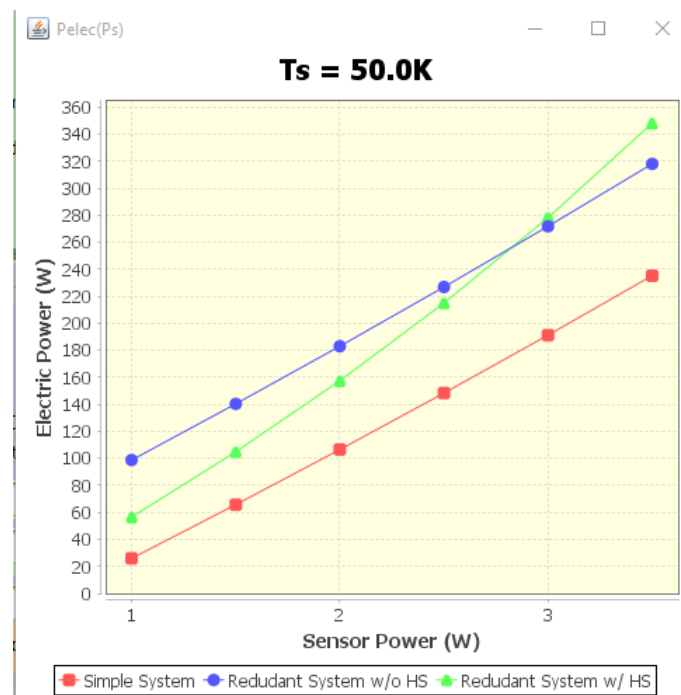


Figura 6.2: Potência elétrica em função da potência do sensor para todos os sistemas com os parâmetros da figura 6.1.

## 6.1. SISTEMA SIMPLES E SISTEMAS REDUNDANTES COM E SEM INTERRUPTORES TÉRMICOS

Analisando a figura 6.2 constata-se que o sistema com interruptores térmicos é sempre vantajoso, para a gama limite de potência elétrica, em relação ao sistema redundante sem interruptores. Nota-se, inclusive, que a curva traçada pela potência elétrica do sistema com interruptores térmicos é diferente das dos outros sistemas. Para entender melhor a razão da diferença entre as curvas é necessário analisar o gráfico da figura 6.3, que representa a temperatura do dedo frio em função da potência do sensor. Observando esse gráfico, a temperatura do criorrefrigerador ligado do sistema com interruptores é sempre inferior à dos outros sistemas e com o aumento da potência essa diferença fica mais notória. Para compensar o aumento da potência no criorrefrigerador, a diferença de temperatura dentro do interruptor tem que aumentar também, porque a condutância do interruptor mantém-se praticamente inalterada.

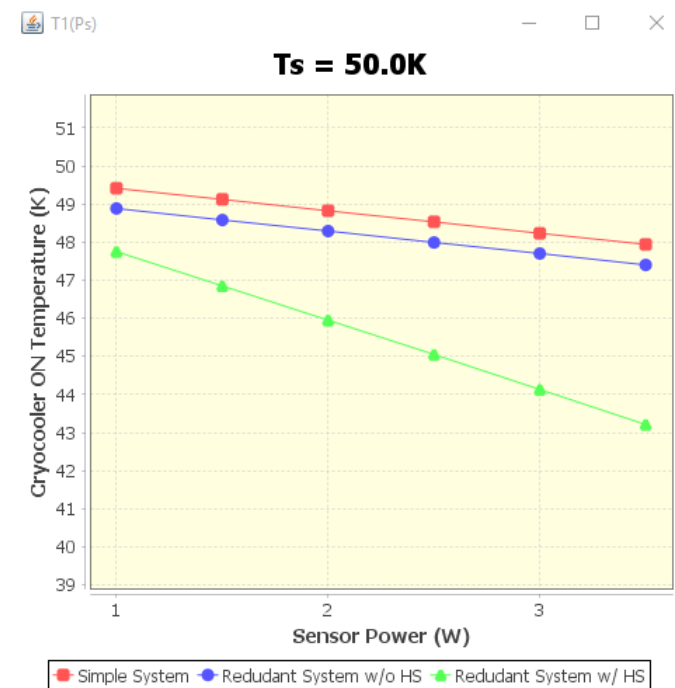


Figura 6.3: Temperatura dedo frio do criorrefrigerador ligado em função da potência do sensor para todos os sistemas com os parâmetros da figura 6.1.

Comparando os três sistemas, o sistema redundante com interruptores térmicos é melhor que o sistema redundante sem interruptores até uma potência de sensor de 2.9 W. Com a introdução dos interruptores, a uma potência de sensor igual a 2 W, a potência elétrica diminui 14 % em comparação com o sistema redundante sem interruptores.

Mantendo inalterados os parâmetros da figura 6.1, excepto o valor da temperatura do sensor que será igual a 60 K, o gráfico da figura 6.4 permite conhecer o ganho que houve em relação a uma temperatura de sensor igual a 50 K. Nota-se também que a curva do sistema simples no primeiro ponto, a 1 W, tem um valor de potência elétrica negativo. Esse valor deve-se ao facto de estar fora da zona válida da equação 4.4 com os coeficientes da tabela 5.1.

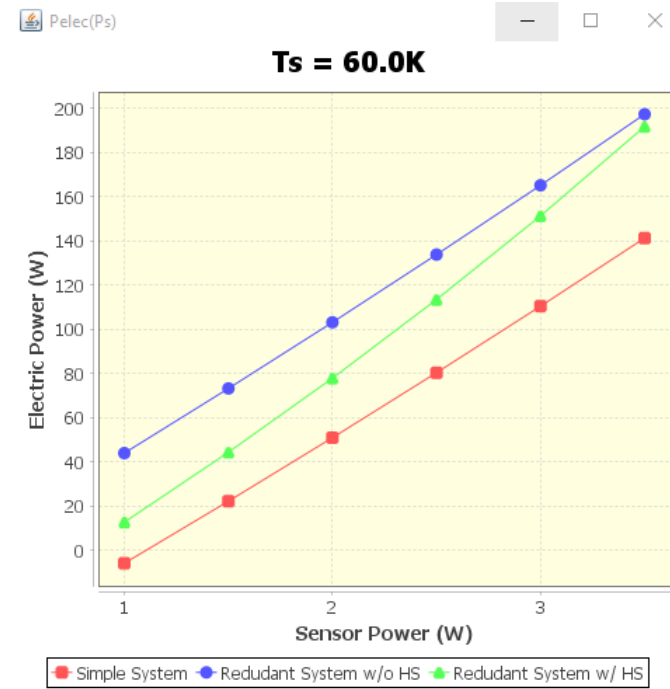


Figura 6.4: Potência elétrica em função da potência do sensor para todos os sistemas com os parâmetros da figura 6.1 a uma temperatura de 60 K.

Ao aumentar a temperatura do sensor a potência elétrica do sistema com interruptores é 25 % menor do que a do sistema sem interruptores.

Com a figura 6.4 verifica-se que o sistema com interruptores é sempre mais vantajoso em toda a gama de potência do sensor.

Apesar de a uma potência igual 3.5 W (figura 6.4) ultrapassar a gama limite da potência elétrica, comparando com o sistema sem interruptores os valores de potências elétricas são sempre inferiores, mostrando assim a vantagem da introdução dos interruptores térmicos no sistema redundante.

Os valores das dimensões dos interruptores que permitem ao sistema redundante aproximar-se dos valores obtidos da potência elétrica do sistema simples, podem ser encontrados na figura 6.5. É importante referir que o valor de comprimento do interruptor é bastante elevado, mas foram cálculos necessários, com o objectivo de quantificar o valor de poupança, se existisse um interruptor térmico com características semelhantes a este.

## 6.1. SISTEMA SIMPLES E SISTEMAS REDUNDANTES COM E SEM INTERRUPTORES TÉRMICOS

Ts (K): 50    Graph&Table    Download file  
 P<sub>min</sub> (K): 1    P<sub>max</sub> (W): 3.5    P<sub>s</sub> step (W): 0.5  
 Connections straps (J1):    Cryocooler tubes (Jcryo\_off):  
 Diameter (mm): Length (mm): Material:    OD (mm): ID (mm): Length (mm): Material:  
 Config1: 5    10    Cu\_RRR...  
 Config2: 5    10    Cu\_RRR...    30    28    300    SS\_304  
 Cryocooler Conductance fixed: ☐ Yes ☒ No Jcryoff (W/m): aT<sup>2</sup> 0    +bT 0.003  
 5    10    Cu\_RRR...    30    28    300    SS\_304  
 Heat Switch  
 Dimensions:    Supporting shell  
 Config3: D<sub>ss</sub> (mm): L<sub>ss</sub> (mm): e<sub>ss</sub> (mm): Gap (mm): Delta (mm): Material:  
 20    300    0.1    0.1    0.5    SS\_304  
 Exchange Gas: Hydrogen    Fit K(T) gas: aT<sup>2</sup> -3E-7    +bT 0.0007    +c 0.0031

Figura 6.5: Parâmetros e dimensões do sistema simples e do sistema redundante sem interruptor e do sistema redundante com interruptor. Interruptores com invólucro de diâmetro 20 mm e comprimento de 300 mm e temperatura do sensor igual a 50 K.

Com estes parâmetros obtém-se um gráfico igual ao da figura 6.6. Analisando o gráfico obtém-se valores próximos entre sistemas, apesar de a partir de uma potência de sensor igual a 2 W ultrapassar o limite de 165 W da potência elétrica.

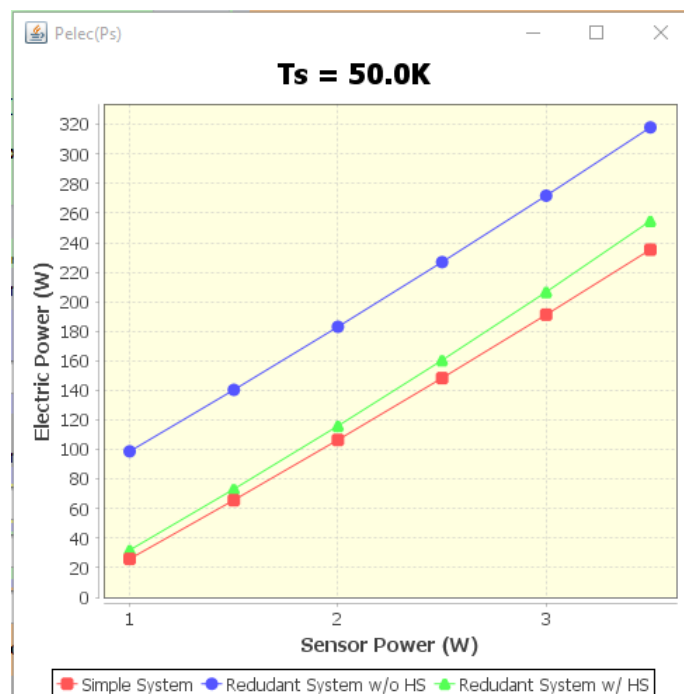


Figura 6.6: Potência elétrica em função da potência do sensor para todos os sistemas com os parâmetros da figura 6.5.

É bastante benéfico o sistema com interruptores térmicos se aproximar do sistema

simples, por um lado porque consegue-se obter um desempenho bastante superior, e por outro porque se houver uma falha no criorefrigerador ligado haverá sempre um outro que permite a continuação da missão.

De modo a saber quais os valores das condutâncias dos interruptores térmicos, para que haja um ganho de pelo menos 20 %, sem que haja alterações na temperaturas do sensor, utiliza-se o modo *condutância fixa* no programa RCS.

O ideal é que a condutância do interruptor ligado seja tão elevada como a condutância das tiras de cobre e que a condutância do interruptor desligado seja tão ou mais reduzido do que a dos tubos do criorefrigerador.

The screenshot shows the RCS software interface with the following settings:

- Ts (K):** 55
- Psmin (W):** 1
- Psmax (W):** 3.5
- Pstep (W):** 0.5
- Buttons:** Graph&Table, Download file
- Config 1:** J1 (W/K): 1
- Config 2:** J1 (W/K): 1, Jcryooff (W/K): 0.003
- Config 3:** J1 (W/K): 1, Jcryooff (W/K): 0.003, JON (W/K): 1, JOFF (W/K): 0.003

Figura 6.7: Condutâncias dos componentes das diferentes configurações. Condutância do estado ligado (JON) = 1 W/m. Condutância do estado desligado (JOFF) = 0.003 W/m.

Com os parâmetros da figura 6.7 obtém-se o gráfico da figura 6.8 e verifica-se que o sistema redundante com interruptores consome menos potência elétrica na gama limite dos 165 W. Para uma potência de sensor igual a 2 W o sistema com interruptores tem um ganho de 8 %.

## 6.1. SISTEMA SIMPLES E SISTEMAS REDUNDANTES COM E SEM INTERRUPTORES TÉRMICOS

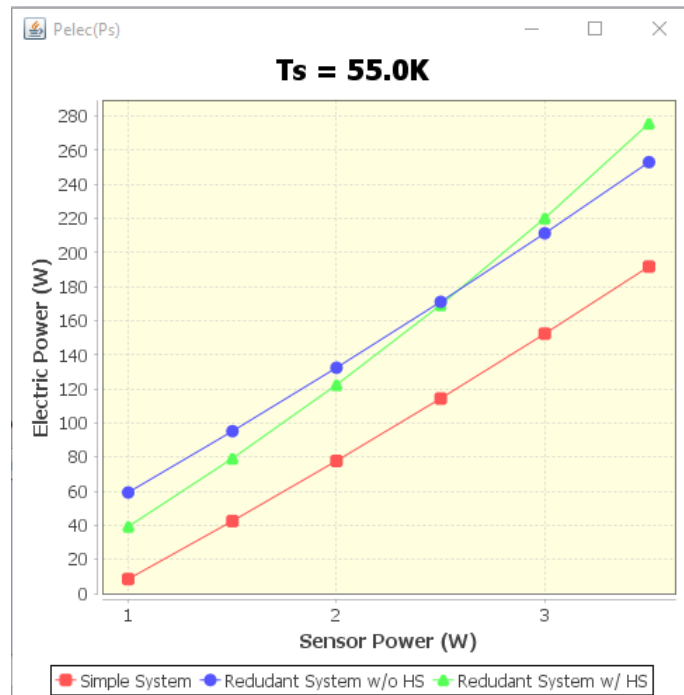


Figura 6.8: Potência elétrica em função da potência do sensor para todos os sistemas com os parâmetros da figura 6.7.

Para conseguir alcançar um ganho na ordem de 20 %, manteve-se a condutância do interruptor térmico ligado e diminuiu-se a condutância do interruptor desligado, como ilustra a figura 6.9.

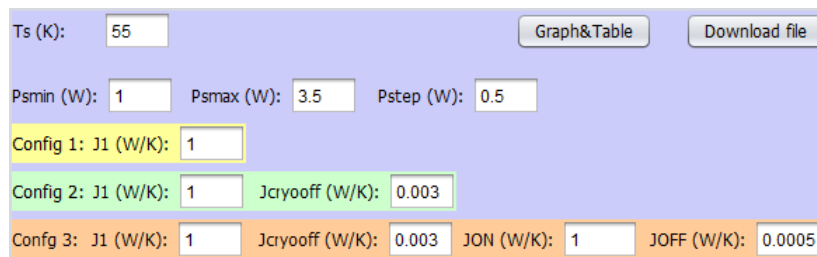


Figura 6.9: Condutâncias dos componentes das diferentes configurações. Condutância do estado ligado ( $J_{ON}$ ) = 1 W/m. Condutância do estado desligado ( $J_{OFF}$ ) = 0.0005 W/m.

Com estas condutâncias foi possível obter o gráfico da figura 6.10. Tal como no gráfico anterior o sistema com interruptores é mais vantajoso, tal que a uma potência de 2 W o seu ganho foi de, aproximadamente, 25 %.

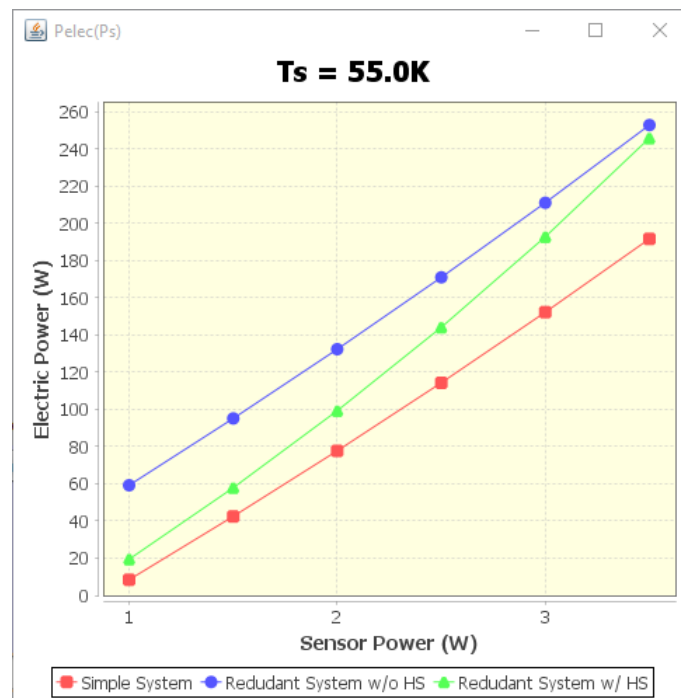


Figura 6.10: Potência elétrica em função da potência do sensor para todos os sistemas com os parâmetros da figura 6.9.

Conclui-se então que ao aumentar a temperatura do sensor mantendo as mesmas dimensões dos componentes consome-se menos potência elétrica por parte dos três tipos de sistemas criogênicos. Ao diminuir a condutância do interruptor térmico desligado, e mantendo a condutância do seu homólogo igual a condutância da ligação de cobre é possível alcançar ganhos de potência elétrica superior a 20 %.



## CONCLUSÕES

Foi elaborado um programa que permite estudar e comparar as várias configurações abordadas durante esta dissertação: o sistema simples, o sistema redundante sem interruptores e o sistema redundante com interruptores. Este programa oferece a possibilidade do utilizador escolher entre condutância fixa e variável dos componentes dos sistemas.

Obteve-se uma comparação entre os sistemas mais utilizados, o sistema simples e o sistema redundante com criorefrigeradores sem interruptores, e concluiu-se que a potência elétrica consumida pelo sistema simples é muito inferior à do sistema redundante. Apesar do menor consumo do sistema simples, a problemática relativa à falha do criorefrigerador mantém-se e é uma questão que não pode ser desprezada. Também não pode ser desprezada o facto de no sistema redundante o calor parasita influenciar a potência frigorífica disponível.

Para diminuir o calor parasita, os interruptores térmicos foram incluídos no sistema redundante com dois criorefrigeradores.

A comparação entre todos sistemas mostrou que a potência elétrica consumida por este novo sistema, a uma temperatura de sensor de 50 K, em que o diâmetro e comprimento do invólucro são de 24.8 mm e 54 mm, respetivamente, é mais vantajoso que o sistema redundante sem interruptores na gama limite de 165 W de potência elétrica, mas é desvantajoso a partir de uma potência de sensor igual a 2.9 W. A 2 W a potência elétrica do sistema redundante com interruptores térmicos tem um ganho de 14 %.

Para conseguir um ganho de 20 % e que a potência elétrica do sistema redundante com interruptores nunca seja superior, em toda a gama de potência de sensor, à potência elétrica obtida pelo outro sistema redundante, aumentou-se a temperatura do sensor para 60 K, mantendo os valores de diâmetro e comprimento do invólucro. Neste caso foi possível alcançar um ganho de 25 %.

Com o intuito de alcançar valores próximos de potências para o sistema simples,

alterou-se de novo o diâmetro e comprimento do interruptor térmico para valores iguais a 20 mm e 300 mm, a uma temperatura de sensor igual a 50 K. Contudo estes valores são bastante grandes para o tamanho de interruptor térmico e será muito difícil que este sistema consiga ter potências elétricas tão baixas como o sistema simples.

Para saber quais os valores de condutâncias que permitem obter um ganho de potência elétrica, do sistema com interruptores, igual ou superior a 20 % a uma temperatura de sensor igual a 50 K, foi feito um estudo que indicou que a condutância do interruptor térmico ligado, precisa de ser igual ou superior à condutância da ligação de cobre e que a do interruptor desligado precisa de ser bastante mais reduzida que as dos tubos metálicos.

Para obter um estudo ainda mais completo seria necessário tomar em consideração a transferência de calor por radiação, que poderá ter influência no calor parasita e na potência frigorífica disponível.

No entanto, os nossos resultados puseram em evidência a importância do estado do interruptor. Com efeito mostram que em caso de um estado ligado pouco condutor, a diferença de temperatura ao longo do interruptor aumenta significativamente com a potência, obrigando a temperatura do dedo frio a diminuir. Esta diminuição induz um aumento muito importante da potência elétrica para manter o poder frigorífico. Este fenómeno explica porque os nossos resultados mostraram uma degradação da eficácia dos sistemas redundantes com interruptores térmicos a alta potência.

Mesmo com resultados satisfatórios como os apresentados, poderiam ser feitos estudos para um outro tipo de interruptor, nomeadamente o de dilatação. Para este interruptor seria feito uma caracterização dos estados ligados e desligados, semelhante à do interruptor térmico de gás de troca. Para esse estudo algumas modificações de código do programa *Redundant Cryocoolers Simulation* seriam feitas, mas mantendo a mesma qualidade verificada para as configurações apresentadas neste trabalho.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] R. G. Ross. “Cryocooler Reliability and Redundancy Considerations for Long-Life Space Missions”. Em: (2000), pp. 1–12.
- [2] Statement of Work. 2015. URL: [http://emits.sso.esa.int/emits/owa/emits\\_online.showao?typ1=6672&user=Anonymous](http://emits.sso.esa.int/emits/owa/emits_online.showao?typ1=6672&user=Anonymous).
- [3] M. Wang, L. Yang, T. Yan, J. Cai e J. Liang. “Development of gas gap cryogenic thermal switch”. Em: *Cryocoolers* 14 (2007), pp. 589–594. URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1982acge...27.1117N>.
- [4] M. Dietrich, a. Euler e G. Thummes. “A compact thermal heat switch for cryogenic space applications operating near 100 K”. Em: *Cryogenics* 59 (2014), pp. 70–75. ISSN: 00112275. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2013.11.004. arXiv: 1307.6367. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cryogenics.2013.11.004>.
- [5] I. Catarino, G. Bonfait e L. Duband. “Neon gas-gap heat switch”. Em: *Cryogenics* 48.1-2 (2008), pp. 17–25. ISSN: 00112275. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2007.09.002.
- [6] [http://www.redshift-live.com/en/magazine/articles/Exploring\\_Space/13873-When\\_cool\\_is\\_not\\_cool\\_enough-1.html](http://www.redshift-live.com/en/magazine/articles/Exploring_Space/13873-When_cool_is_not_cool_enough-1.html). [Online; acedido em 09-09-2015].
- [7] R. F. Boyle. “Overview of NASA space cryocooler programs”. Em: *AIP Conference Proceedings* 613.1 (2002), pp. 1037–1044. ISSN: 0094243X. DOI: 10.1063/1.1472126. URL: <http://link.aip.org/link/?APC/613/1037/1&Agg=doi>.
- [8] R. Radebaugh. “Development of the Pulse Tube Refrigerator as an Efficient and Reliable Cryocooler”. Em: *Institute of Refrigeration* (2000), p. 1999.
- [9] J. Weisend II. *Handbook of Cryogenic Engineering*. 1998.
- [10] <https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/beta.html>. [Online; acedido em 09-09-2015].
- [11] J. Y. Hu, W. Dai, E. C. Luo, X. T. Wang e Y. Huang. “Development of high efficiency Stirling-type pulse tube cryocoolers”. Em: *Cryogenics* 50 (2010), pp. 603–607.
- [12] R. Radebaugh. “Pulse tube cryocoolers for cooling infrared sensors”. Em: *Proceedings of SPIE* 4130 (2000), pp. 363–379.

- [13] B. Marland, D. Bugby e C. Stouffer. "Development and testing of an advanced cryogenic thermal switch and cryogenic thermal switch test bed". Em: *Cryogenics* 44 (2004), pp. 413–420. ISSN: 00112275. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2004.03.014.
- [14] M. D. e. B. Catarino, I. Afonso, J. "Gas gap thermal switches using neon or hydrogen and sorption pump". Em: *Vacuum* 83 (2009).
- [15] F. Incropera. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer - 6th Edition*.
- [16] J. Barreto. "Gas Gap Heat Switch for CryoFree Project". Tese de mestrado. 2014.
- [17] I. Catarino e D. C. Paine. "3He gas gap heat switch". Em: (*Cryogenics* 51.1 (2011), pp. 45).
- [18] <http://www.cryogenics.nist.gov/MPPropsMAY/materialproperties.htm>. [Online; acedido em 18-03-2015].
- [19] <http://www.techapps.com/copper-thermal-strap-assemblies>. [Online; acedido em 09-09-2015].
- [20] Diogo Lopes. comunicação pessoal. 2015.
- [21] <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>. [Online; acedido em 20-06-2015].
- [22] [https://pt.wikipedia.org/wiki/Java\\_](https://pt.wikipedia.org/wiki/Java_). [Online; acedido em 09-09-2015].
- [23] <https://pt.wikipedia.org/wiki/Orienta>. [Online; acedido em 09-09-2015].
- [24] <http://www.tiobe.com/index.php/content/paperinfo/tpci/index.html>. [Online; acedido em 09-09-2015].



# A P Ê N D I C E

## A.1 Tabelas de condutividades térmicas dos gases

Tabela A.1: Erros relativos e condutividades térmicas do Hidrogénio.

Temperatura	k fits (W/m.K)	k térmica <i>NIST</i> (W/m.K)	Erro relativo (%)
50	0.0374	0.0384	2.72
100	0.0701	0.0683	2.58
150	0.1014	0.1010	0.39
200	0.1311	0.1324	1.01
250	0.1594	0.1606	0.77
300	0.1861	0.1858	0.18

Tabela A.2: Erros relativos e condutividades térmicas do Hélio.

Temperatura	k fits (W/m.K)	k térmica <i>NIST</i> (W/m.K)	Erro relativo (%)
50	0.0436	0.0467	6.59
100	0.0691	0.0737	6.29
150	0.0916	0.0969	5.51
200	0.111	0.118	5.83
250	0.128	0.138	7.23
300	0.141	0.156	9.53

Tabela A.3: Erros relativos e condutividades térmicas do Azoto.

Temperatura	k fits (W/m.K)	k térmica <i>NIST</i> (W/m.K)	Erro relativo (%)
100	0.00990	0.00987	0.29
150	0.0138	0.0146	5.33
200	0.0172	0.0187	7.82
250	0.0202	0.0224	9.93
300	0.0227	0.0259	12.21

Tabela A.4: Erros relativos e condutividades térmicas do Néon.

Temperatura	k fits (W/m.K)	k térmica <i>NIST</i> (W/m.K)	Erro relativo (%)
50	0.012	0.013	9.08
100	0.020	0.023	11.34
150	0.028	0.030	9.34
200	0.034	0.037	7.98
250	0.040	0.043	7.82
300	0.044	0.048	0.18

## A.2 Pseudo-Código

Para perceber um pouco melhor o código que foi implementado no programa, foram criados alguns *UML's* (Linguagem de Modelagem Unificada) e diagramas de blocos de modo a simplificar o entendimento de algumas das classes implementadas no programa.

### Materiais

Os componentes podem ser de diferentes materiais e no programa existe uma classe para cada material. Nessa classe estão incluídos os coeficientes, de cada material, que permitem calcular a sua condutividade. Na figura A.1 está representando um exemplo de como é constituída a classe. O material escolhido, para exemplificar, foi o "CuRRR100". Pelo *UML* da figura A.2 entende-se de que modo a classe está implementada.

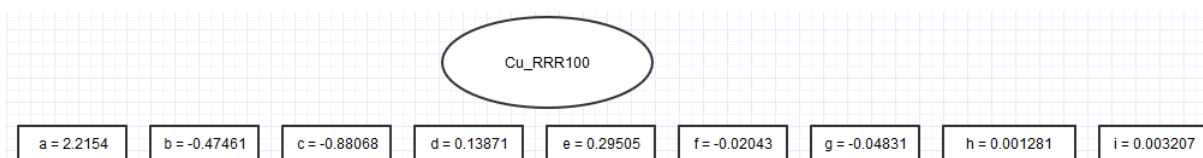


Figura A.1: Diagrama de blocos relativo à classe "CuRRR100".

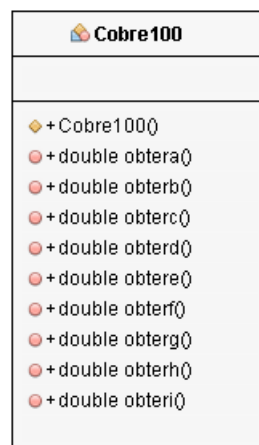


Figura A.2: *UML* relativo à classe "CuRRR100".

### Condutância

Para calcular a condutância do componente o programa comporta-se como demonstra a figura A.3

São introduzidas as dimensões do componente e sabendo qual o material que o constitui é possível calcular a sua condutividade à temperatura a que se encontra, permitindo assim calcular a condutância.

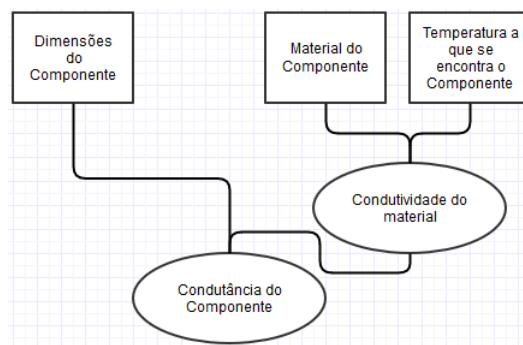


Figura A.3: Diagrama de blocos relativo à classe "condutância".

Pela figura A.4 entende-se de que modo a classe está implementada. Nota-se que na condutividade são introduzidas o nome do material e a temperatura.

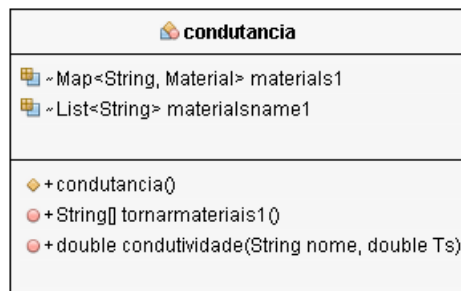


Figura A.4: UML relativo à classe "condutância".

O cálculo da condutância faz parte de uma classe chamada "controle".

## Controlo

Esta classe é a classe mais importante de todo o programa, é considerada a *main class*.

A figura A.5 representa um dos cálculos feitos na classe "controle". Neste caso em particular são calculados todos os valores correspondentes ao sistema redundante com interruptores térmicos. São introduzidas várias variáveis que permitem o cálculo dos valores.

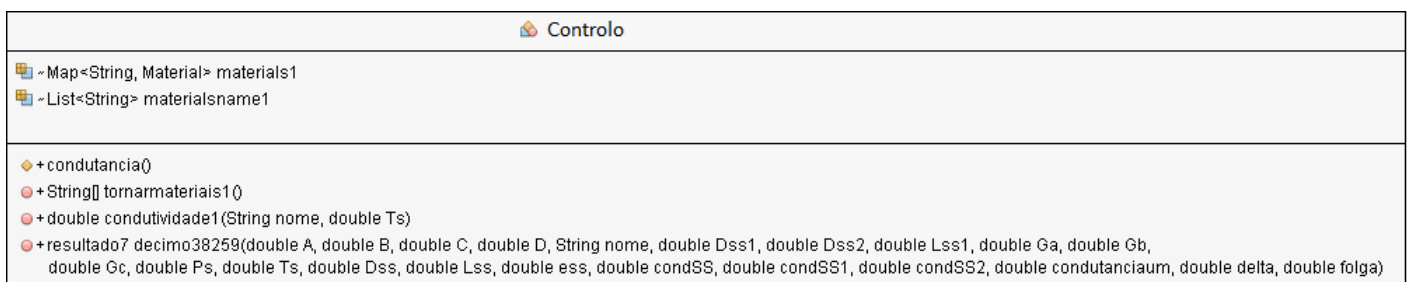


Figura A.5: UML relativo à classe "controle".



Nesta classe serão calculadas todas as equações referidas ao longo desta dissertação, com uma sequência semelhante à da figura A.6

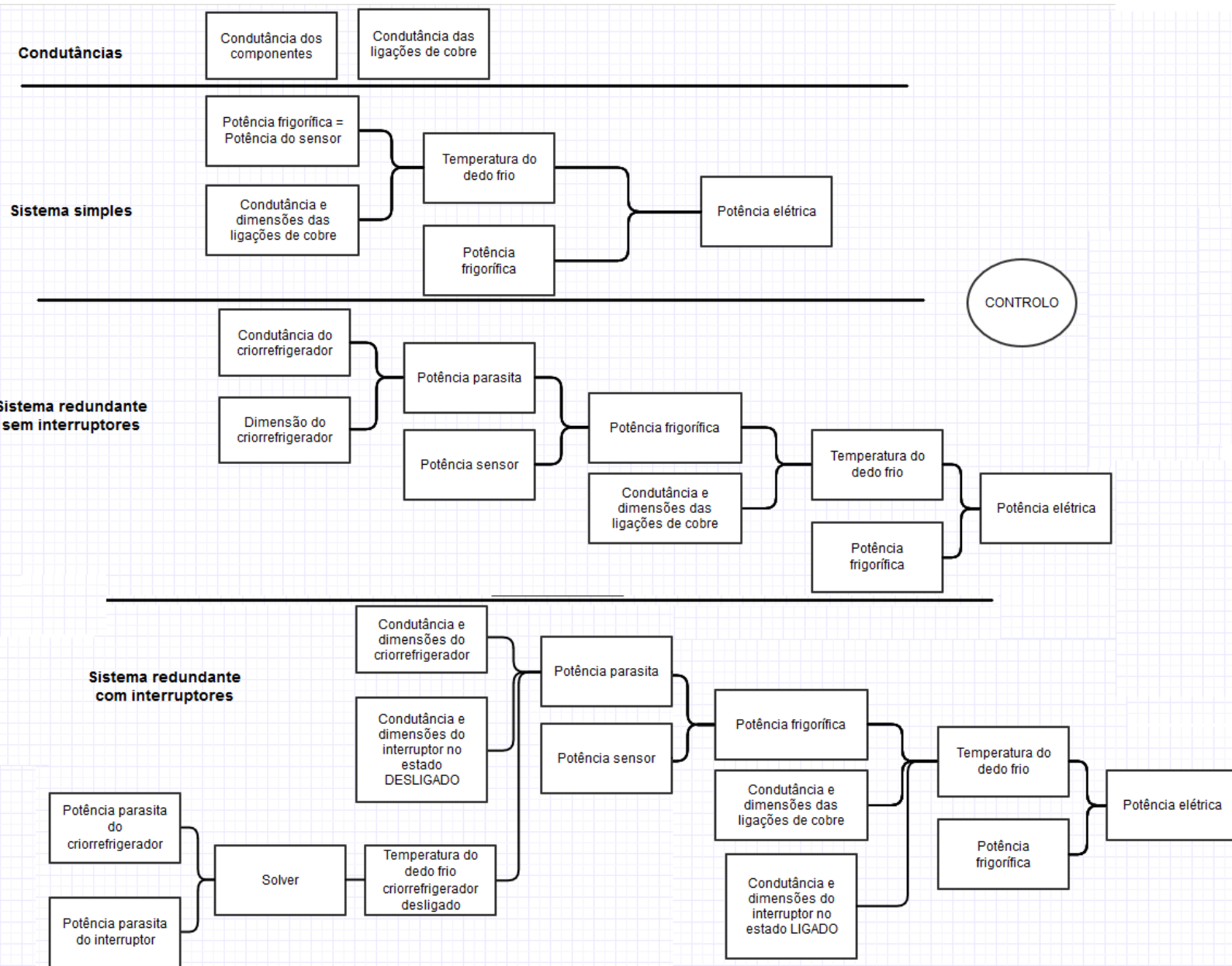


Figura A.6: Diagrama de blocos relativo à classe "controle".